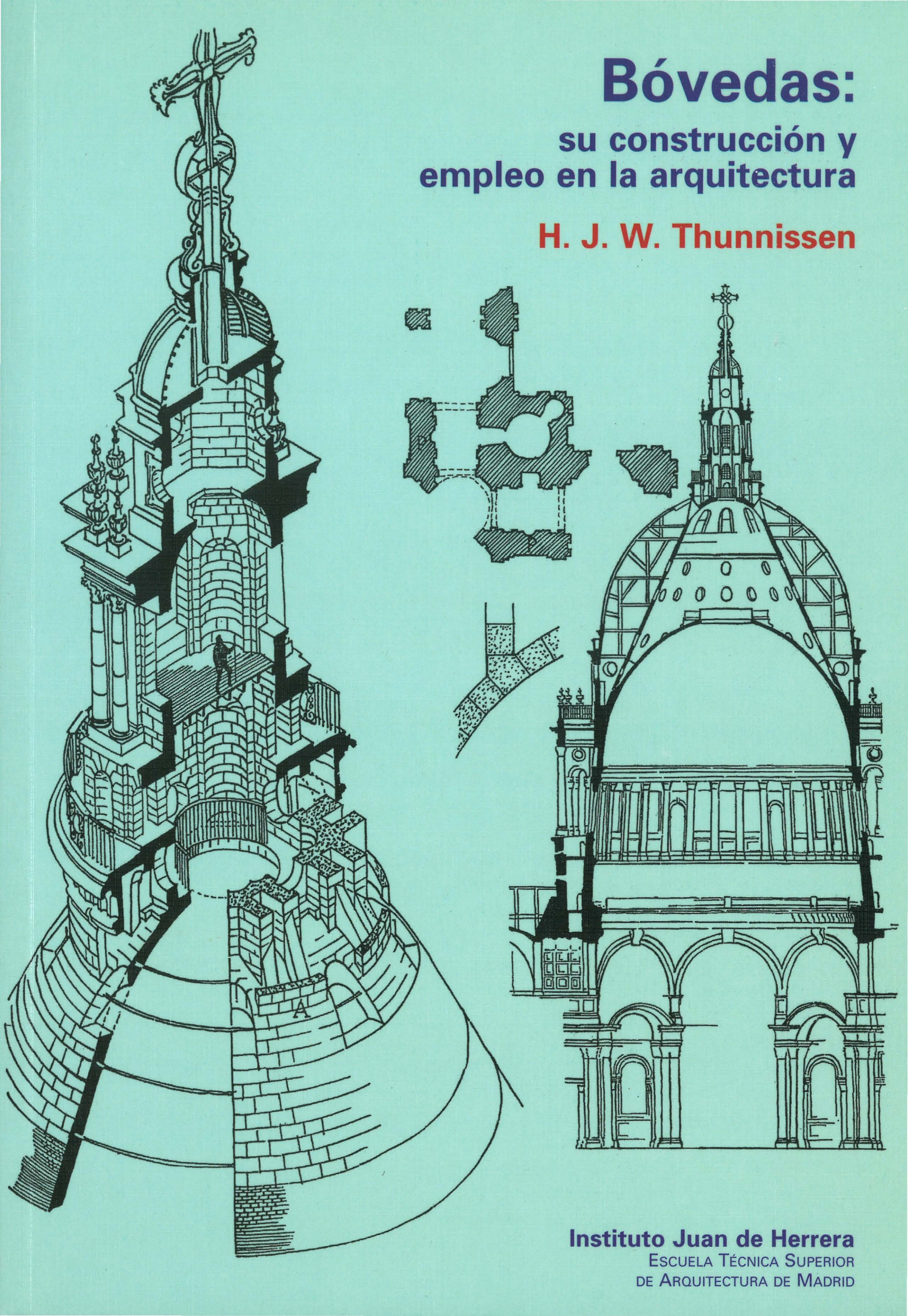
Bóvedas:
su construcción y empleo en la arquitectura

H. J. W. Thunnissen



Instituto Juan de Herrera
Escuela Técnica Superior
de Arquitectura de Madrid

H. J. W. Thunnissen (1890-1978) fue un arquitecto-ingeniero holandés que, desde los inicios de su carrera profesional en los años 1910-20, optó por una arquitectura abovedada. Hasta la Segunda Guerra mundial construyó bóvedas y realizó estudios sobre construcciones abovedadas históricas. Durante la guerra su negativa a colaborar con los nazis le obligó a un paro forzoso. Decide, entonces, publicar un libro sobre bóvedas, su gran pasión. Desde 1942 hasta su publicación en 1950 trabaja intensamente en su redacción y en el dibujo de las láminas.

La mayor parte del libro está dedicada a la historia de las bóvedas, pero no es un libro de historia. Es un libro escrito por un arquitecto que cree firmemente que la construcción abovedada debe formar parte de la arquitectura. El estudio de los grandes monumentos del pasado es el camino para alcanzar el verdadero objetivo que es la maestría en el arte de abovedar.

El libro comienza con el estudio de la geometría, de las posibles formas y los problemas constructivos que suponen. El brevísimo capítulo sobre estética sirve sólo para reafirmar su convicción sobre la bondad y la necesidad de las bóvedas también desde el punto vista estético.

En la parte histórica explica con claridad la evolución del arte de abovedar en las distintas épocas. El afán no es arqueológico: trata de plantear los problemas inherentes al abovedamiento y su contrarresto, y de explicar las distintas soluciones. Finalmente, estudia las «bóvedas actuales», las que él y algunos arquitectos todavía construían en los años 1930 y 1940. El libro termina con un estudio de la estabilidad de las bóvedas y una selecta bibliografía de fuentes consultadas.

Todo el libro transmite entusiasmo por las posibilidades de la construcción abovedada, ignorada por el movimiento moderno. No hay motivo para renunciar a uno de los más bellos elementos arquitectónicos.

TEXTOS SOBRE TEORÍA E HISTORIA DE LAS CONSTRUCCIONES
Colección dirigida por Santiago Huerta

M. Arenillas et al. (Eds.). **Actas del V Congreso Nacional de Historia de la Construcción**

F. Bores et al. (Eds.). **Actas del II Congreso Nacional de Historia de la Construcción**

A. Casas et al. (Eds.). **Actas del I Congreso Nacional de Historia de la Construcción**

A. Choisy. **El arte de construir en Roma**

A. Choisy. **El arte de construir en Bizancio**

A. Choisy. **El arte de construir en Egipto**

A. Choisy. **Historia de la arquitectura** (en preparación)

J. Girón y S. Huerta. **Auguste Choisy (1841-1909). L'architecture et l'art de bâtir**

A. Graciani et al. (Eds.). **Actas del III Congreso Nacional de Historia de la Construcción**

R. Guastavino. **Escritos sobre la construcción cohesiva y su función en la arquitectura**

J. Heyman. **Análisis de estructuras: un estudio histórico**

J. Heyman. **El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica**

J. Heyman. **La ciencia de las estructuras**

J. Heyman. **Teoría básica de estructuras**

J. Heyman. **Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica**

J. Heyman. **Vigas y pórticos**

S. Huerta. **Arcos, bóvedas y cúpulas**

S. Huerta (Ed.). **Actas del IV Congreso Nacional de Historia de la Construcción**

S. Huerta et al. (Eds.). **Actas del VI Congreso Nacional de Historia de la Construcción**

S. Huerta et al. (Eds.). **Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción**

S. Huerta (Ed.). **Las bóvedas de Guastavino en América**

S. Huerta (Ed.). **Essays in the History of the Theory of Structures**

S. Huerta (Ed.). **Proceedings of the 1st International Congress on Construction History**

J. R. Perronet. **La construcción de puentes en el siglo XVIII**

H. Straub. **Historia de la ingeniería de la construcción** (en preparación)

H. Thunnissen. **Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura**

A. Truñó. **Construcción de bóvedas tabicadas**

E. Viollet-le-Duc. **La construcción medieval**

R. Willis. **La construcción de las bóvedas medievales**

Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura

Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura

Henri J. W. Thunnissen

Edición a cargo de:
Santiago Huerta y Rafael García García

Prólogo de:
Santiago Huerta

Traducción y
ensayo introductorio de:
Rafael García García

con una nota biográfica de:
Claudia Thunnissen

INSTITUTO JUAN DE HERRERA
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Madrid

Edición y traducción íntegra de la edición original: H. J. W. Thunnissen, *Gewelven. Constructie en toepassing in de historische en hegendaagse bouwkunst.* Amsterdam: N. V. Wed. Ahrend & Zoon, 1950.

ISBN: 978-84-9728-425-7
Depósito Legal: M. 00.000-2012
Cubierta: Cúpula y detalle de la línterna de S. Pablo de Londres. Dibujo de H. Thunnissen, según W. Dunn.

Fotocomposición e impresión: EFCA, S. A.

Índice

Láminas

CONSTRUCCIÓN

LA EDAD MEDIA

RENACIMIENTO Y BARROCO

BÓVEDAS MODERNAS

ANÁLISIS ESTÁTICO

Prólogo

A principios del siglo XX se produce un cambio copernicano en la arquitectura. La construcción abovedada, que había dominado durante milenios, entra en rápida decadencia. Se produce una súbita aceleración del proceso iniciado en el siglo XIX por el auge de los nuevos materiales (hierro, acero, hormigón armado) y la revolución industrial, que llevó a la moderna arquitectura. Citando al profesor Salvador Tarragó, hay una ley no escrita de la nueva arquitectura: «Está prohibido construir arcos o bóvedas». Con escasas excepciones esta ley se cumple.

Algunos arquitectos, posiblemente más de los que se piensa, decidieron continuar la tradición de la construcción abovedada, aprovechando las ventajas que el hierro y el hormigón armado ofrecían en la búsqueda de sistemas de equilibrio, en el proyecto y construcción de los sistemas de contrarresto.

Este fue el caso del arquitecto-ingeniero holandés Henri Thunnissen. No fue el único, en toda Europa y en América, notables arquitectos persistieron en "el camino equivocado": Jujol y Martinell en España, Dom. Paul Bellot en Francia, o Rafael Guastavino hijo en EE.UU., por citar algunos casos bien conocidos.

En las universidades, los viejos profesores siguieron enseñando la construcción de bóvedas, recomendando a sus alumnos los grandes tratados del siglo XIX y principios del XX. Rondelet, Breymann, Viollet-le-Duc, Choisy, Ungewitter/Mohrmann, Esselborn, etc. (citados en la bibliografía de este libro), siguieron siendo au-

tores de referencia en la enseñanza de la construcción. Sin embargo, apenas se escribían nuevos libros para una técnica en vías de desaparición.

Hubo algunas excepciones. El libro del profesor Hess del Politécnico de Zurich, sobre *Forma y construcción en la arquitectura* (1943) dedica la mayor parte a la construcción tradicional. Emil Goethals publica en 1949 un librito, en holandés y francés, sobre *Arcos, bóvedas y cúpulas*, donde se vuelve de nuevo sobre las bóvedas tradicionales.

Pero el libro más ambicioso e importante es el escrito por Henri Thunnissen y que se publica ahora en castellano. Según Fitchen es, con diferencia, el libro más completo publicado sobre la construcción abovedada. Ciertamente, debemos a Fitchen, autor de uno de los libros más populares e influyentes de historia de la construcción, *On the construction of gothic cathedrals* (1961), que el libro de Thunnissen haya sido conocido fuera del ámbito neerlandés. La extraordinaria bibliografía del libro de Fitchen (que se sigue reimprimiendo con regularidad al cabo de medio siglo) fue la guía para muchos estudiosos posteriores. La inclusión del libro de Thunnissen y su elogiosa apreciación, hizo que autores posteriores lo incorporaran a sus respectivas listas bibliográficas. No obstante, parece dudoso que fuera leído. De hecho, no hay referencias a su contenido, y sus preciosas láminas no se reproducen fuera del ámbito neerlandés.

Parecía, pues, evidente que se trataba de un libro importante y lo busqué durante años. Sin embargo, no estaba en ninguna biblioteca española o extranjera de las muchas que llegué a consultar. Cuando, finalmente, tuve en mis manos un ejemplar, hace casi dos decenios, aunque me fue imposible su lectura, el estudio de las láminas me demostró que, en efecto, Thunnissen había utilizado la literatura más relevante, extractando y combinando la información de forma clara y directa. Se combinaba el interés histórico con la aplicación en la práctica. También me descubrió un mundo desconocido, el de la construcción de bóvedas de los maestros neerlandeses de la primera mitad del siglo XX (Cuypers, v.d. Valk, Berlage, Stuyt, y el propio Thunnissen).

Al cabo de los años, gracias al trabajo del profesor Rafael García y la amabilidad de la familia Thunnissen, de su hijo André y su nieta Claudia, he podido cumplir mi sueño de estudiar y editar a Thunnissen en castellano. El libro tiene

carácter recopilatorio y contiene una extraordinaria selección de información sobre la construcción abovedada, su técnica, historia y posibilidades, pero transmite un entusiasmo que no dejará indiferente a aquellos que lo estudien. Hay libros que informan, otros convencen, y los mejores mueven a la acción. Creo sinceramente que la publicación de este libro contribuirá a la recuperación e incorporación de la construcción abovedada a la arquitectura actual. Como poco nos permitirá entender y apreciar mejor estas construcciones, lo que redundará en su mejor conservación.

AGRADECIMIENTOS: Agradezco a Almudena Ríos Granell su ayuda desinteresada en la laboriosa tarea de componer las láminas para esta edición.

SANTIAGO HUERTA

Henri Thunnissen. Construcción abovedada, tradición y arquitectura

por Rafael García García

El libro *Gewelven. Constructie en toepassing in de historische en hedendaagse bouwkunst* (Bóvedas. Construcción y aplicación en la arquitectura histórica y en la actual) del arquitecto neerlandés Henri Thunnissen puede considerarse un auténtico canto de cisne sobre el tema de las bóvedas y cúpulas de fábrica. Publicado en 1950 en Ámsterdam por la editorial Ahrend en Zoon, cuando ya la nueva técnica del hormigón armado había desplazado casi totalmente la práctica tradicional de construcciones abovedadas, despertó sin embargo todavía bastante interés en su momento entre los círculos profesionales de su país.[1] M. J. Granpré Molière, entonces director de la escuela de arquitectura de Delft y autor del prólogo de *Gewelven* se preguntaba si «existía ya algo en esta materia que pudiera compararse con la síntesis de este libro desde los puntos de vista histórico, constructivo, técnico y de diseño».[2]

Fuera de los Países Bajos no parece haber tenido, sin embargo, una repercusión significativa y muy probablemente su exclusiva edición en neerlandés contribuyó a lo limitado de su difusión. Ésta, casi con toda seguridad, es también la causa de su prácticamente total desconocimiento en el mundo hispano hablante. No obstante, por su amplitud y profundidad, por la claridad pedagógica y por aunar en él, tanto los aspectos descriptivos como los constructivos e históricos, resultó ser una obra ejemplar y por ello incomprensiblemente olvidada.[3] Es por ello

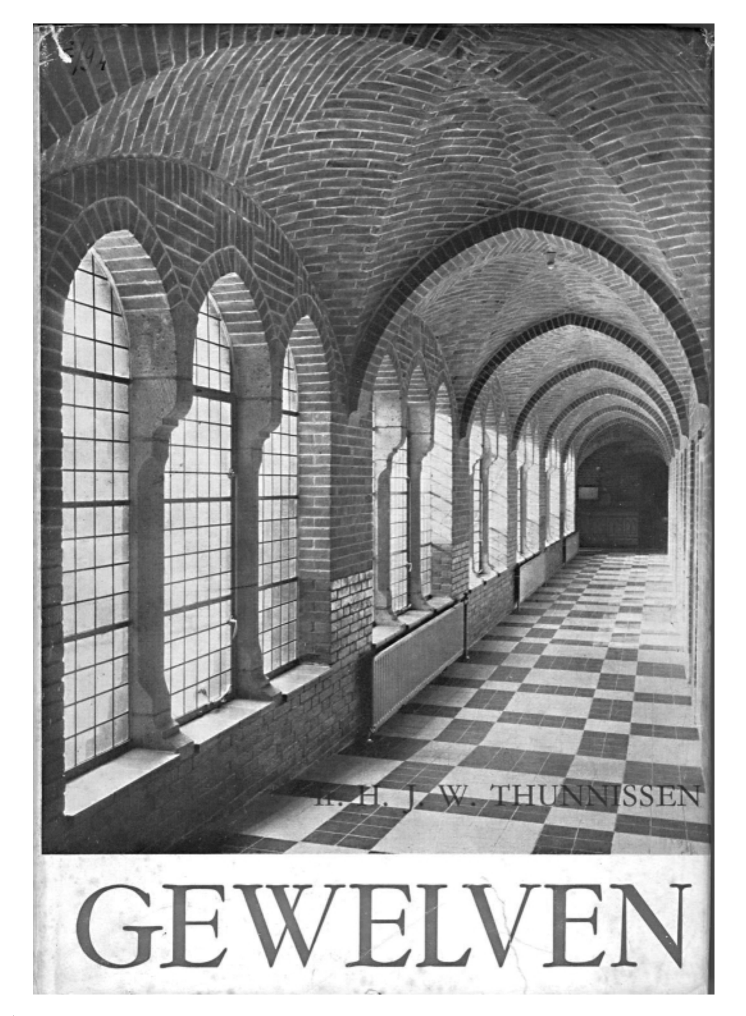


Figura 1
Portada de la edición original de *Gewelven*

que en esta introducción pretendemos en realidad un doble objetivo: presentar dicho tratado en sus rasgos esenciales y aproximarnos a la figura de su autor. Parecía de justicia, por tanto, no solo hacer algunos comentarios sobre la calidad y oportunidad de esta obra, sino indagar también en la personalidad y trayectoria de alguien que tanto empeño había puesto en transmitir lo mejor de un mundo constructivo ya entonces prácticamente en desaparición.

La obra

Gewelven, fue concebido principalmente como un libro de recopilación de toda la historia de este tipo de construcciones.[4] Con ello dejó también constancia de casi toda una vida dedicada a su estudio, surgida de una íntima necesidad y a la que resolvió dar forma en un libro. Debe resaltarse a este respecto que fue un afán puramente personal, ya que Thunnissen no tuvo responsabilidades docentes que justificaran su redacción.[5] No se trató, por tanto, de ningún encargo u obra destinada a un ámbito académico concreto o demandada bajo un programa preciso. El esquema seguido en *Gewelven* fue, como hemos dicho, el de una extensa recapitulación, incluyendo en las trescientas cincuenta y una páginas de su edición original, el estudio de los principales y mejores ejemplos conocidos de bóvedas y cúpulas. Su recorrido partió desde las primeras civilizaciones en que estas cubiertas abovedadas fueron sistemáticamente desarrolladas, es decir desde el área de Mesopotamia, hasta los últimos grandes experimentos de la época barroca tardía y el neoclasicismo, pero incluyendo también una rica colección de ejemplos más actuales y que para él marcaban una trayectoria todavía viva para esta técnica.

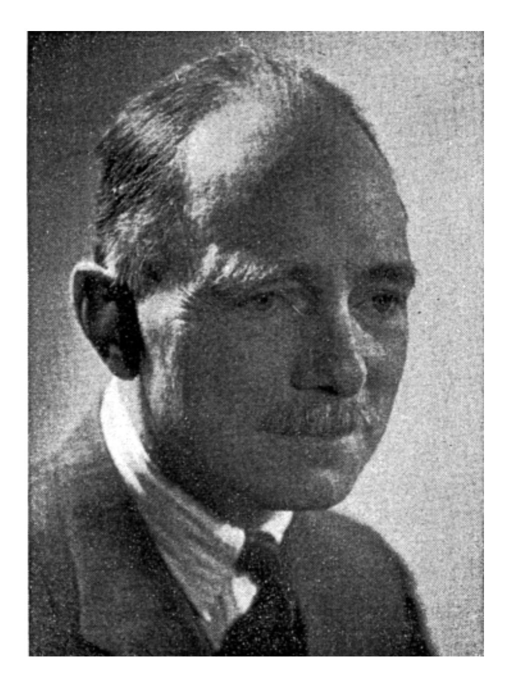


Figura 2
Henri Thunnissen

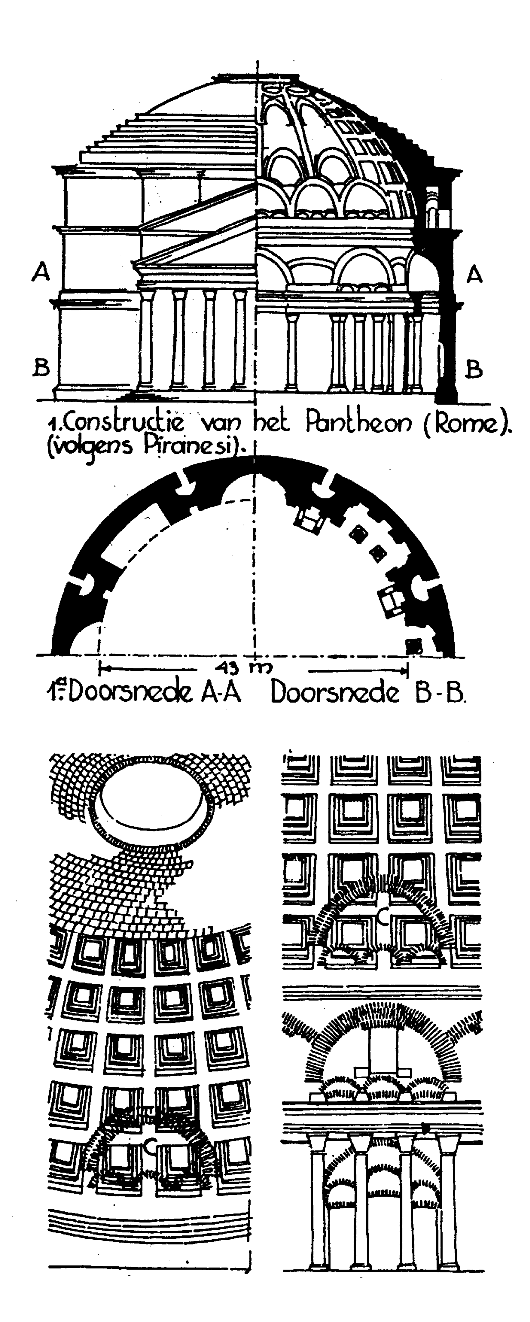


Figura 3
Panteón según Piranesi y Rivoira. *Gewelven*, Lám. 26

Thunnissen concibió un libro ampliamente ilustrado, con 139 láminas que alternan con el texto, realizadas con dibujos realizados a mano y completadas con algunas fotografías. Éstas, principalmente de interiores, tuvieron, no obstante, un papel más bien de complemento, acompañando y presentando algunas soluciones particulares. En gran parte, y especialmente en los referentes a ejemplos históricos, dichos dibujos son versiones propias redibujadas de las ilustraciones originales de sus fuentes, que siempre citó en las láminas. Ello permite, por otra parte, hacer el repaso de las referencias de autores manejadas a lo largo del libro cómoda e inequívocamente.[6] Todos los dibujos fueron sencillamente elaborados y presentan una total unidad de estilo desde la primera a la última ilustración, siendo destacable en ellos su economía de medios, limitándose al dibujo a línea a mano alzada realizado con precisión y elegancia. La intención es siempre pedagógica y a favor de la claridad, eliminando cualquier elemento superfluo.

Acompañando dichos dibujos dispuso siempre una abundante cantidad de notas y pies de ilustraciones, rotuladas meticulosamente a mano (en el original) y siempre con el mismo estilo caligráfico. Desde un punto de vista compositivo, estos textos se intercalan entre los dibujos contribuyendo al equilibrio visual de cada lámina. De especial interés además, es el hecho de que permiten una especie de duplicación del discurso, una lectura en paralelo, complementaria a las páginas de texto tipográfico y resumiendo o resaltando las cuestiones más importantes. Esto es especialmente destacable, por ejemplo, en la presentación de algunas obras singularmente importantes, en donde el texto manual que acompaña los dibujos fue especialmente extenso.

Buscando una estructura clara y comprensible, el libro fue dividido en cinco capítulos de los cuales los tres primeros pueden considerarse una especie de introducción al cuarto, titulado «De gewelfbouw in de loop der tijden» (La construcción abovedada a lo largo de los tiempos), y verdadero núcleo fundamental de la obra con sus 228 páginas. Un quinto capítulo denominado «la investigación de la estabilidad de las bóvedas» pone fin al libro acompañado de una bibliografía por apartados y un registro de nombres citados en el texto. La necesidad de los mencionados tres capítulos previos de acompañamiento se deduce de su propia comprensión de los problemas involucrados, que «se pueden casi siempre

reducir a los de carácter geométrico, constructivo o estético».[7] En consecuencia, dichos capítulos previos fueron titulados «problemas de naturaleza geométrica», «problemas de naturaleza constructiva» y «problemas de naturaleza estética», respectivamente.

Una ojeada al primero de ellos muestra en apariencia una exposición relativamente clásica de aspectos geométricos y construcciones gráficas referentes a las distintas formas abovedadas. No obstante, la selección de casos y la coherencia de tratamiento hacen que sea en realidad una muy didáctica síntesis de soluciones prácticas reales, evitando plantear problemas meramente especulativos o teóricos. Como sucederá en el resto del libro, su inspección detallada muestra que desde luego no se trata de una simple reproducción de clichés o figuras manidas.[8]

La misma orientación práctica se mantuvo también en el segundo capítulo, en donde tras breves consideraciones sobre la relación de las bóvedas con el resto de elementos y sobre los materiales, se pasa a comentar el proceso de su construcción. De una manera también muy gráfica y visual se explican las correctas soluciones de arranques, despieces y coronaciones de arcos, continuando con la descripción de cimbras y métodos de descimbrado. Muestra de su calidad didáctica son, por ejemplo, sus explicaciones de casos especialmente complejos como los despieces de bóvedas de cañón oblicuas y algunos casos concretos de bóvedas para escaleras de caracol, tratadas con gran sentido sintético.

Mucho más corto es, sin embargo, el capítulo sobre los problemas de naturaleza estética, al que solo se dedican dos páginas. Le sirven para mencionar, no obstante, la importancia de aspectos como las proporciones del espacio interior o la continuidad y relaciones entre bóveda y muro. De notar es también, por ejemplo, el interés concedido a la factura y acabado, con una alabanza del trabajo manual y sus necesarias imperfecciones como elementos importantes para alcanzar efectos estéticos. Con ellos se relacionan también la forma y dirección de las juntas, considerados como «un medio en las manos del constructor de bóvedas para alcanzar esos efectos».[9] Lejos de una exposición neutra y desapasionada, aunque sin entrar en conflicto con la objetividad, en este capítulo se dan claras muestras de su admiración por la

sabiduría de las soluciones del pasado. Un ejemplo, en la conclusión del mismo, sería su elogio del arte constructivo persa, «el cual muestra tal número de hallazgos que uno no sabe qué admirar más, si la maestría con que el albañil supo crear las formas o las variaciones en la posición de los ladrillos, si la alternancia en la aplicación de ladrillos vidriados y normales, o el gusto con el que están solucionados todos los posibles encuentros complicados y vuelos».[10]

Sin pretender en estas pocas líneas dar cuenta de toda la extensión y matices tratados en el que, como indicamos, es el capitulo central de la obra, es preciso notar, no obstante, que para su redacción, al igual que con las ilustraciones, recurrió prácticamente a todas las fuentes más autorizadas hasta el momento en cada apartado, dando lugar a una síntesis en la que éstas se destilan en un precipitado denso en conceptos y observaciones. No obstante, ello no hace del libro una acumulación casuística, ya que, entre otras cosas, las páginas de texto que acompañan a las láminas aportan abundante información complementaria y contextual. Especial mención, a este respecto, hay que hacer de las primeras doce páginas del capítulo, en las que se describen sin ilustraciones las características generales de la construcción abovedada en cada una de las principales áreas y épocas históricas.

Dichas páginas son de gran interés en cuanto condensan buena parte de su pensamiento en relación al tema, además de ofrecer un precioso resumen de conceptos constructivos e ideales estéticos de las diferentes épocas. A través de ellas queda evocado cómo por ejemplo, Egipto y Mesopotamia desarrollaron la técnica de construcción al aire, sin cimbra, frente al caso de los romanos, que «dispusieron de muchos medios auxiliares, tuvieron madera y otros materiales en abundancia, y pudieron poner a trabajar prisioneros de guerra, esclavos y pobladores de los territorios conquistados en gran número».[11] Así mismo resalta cómo éste, a su vez, contrastó con el arte constructivo de Bizancio, el cual «creó una nueva forma abovedada… que pudo realizarse a mano y sin apoyo, es decir sin cimbras»,[12] o con el de Persia, con el hallazgo «de dar a las bóvedas una forma peraltada… que es la mejor y más económica».[13]

Dentro de estas mismas páginas introductorias al capítulo principal, en las que prosiguen sustanciosos comentarios sobre las concepciones y temperamentos del

mundo medieval, renacentista y barroco, destacaríamos especialmente sus consideraciones sobre las posibilidades actuales:

> Además, la construcción abovedada se presta a ulteriores desarrollos. Por nuestro conocimiento de la matemática y su aplicación en la construcción de bóvedas estamos en condiciones de hacer bóvedas con más seguridad, porque podemos determinar por adelantado mejor que antes si la firmeza será suficientemente grande.
>
> Un ejemplo lo da la moderna construcción de cúpulas, en las que la experiencia obtenida con las bóvedas de pequeño espesor del Renacimiento se aprovecha para aplicaciones modernas. Junto a ello juegan además un papel materiales de ayuda como el hormigón o el acero.[14]

Entre dichas consideraciones, incluye también una deseable reapreciación de este tipo de construcciones: «Es posible e incluso probable que un nuevo desarrollo esté frente a nuestras puertas. Y no es temerario esperar que modernos ideales puedan encontrar una solución satisfactoria mediante la construcción abovedada».[15] Por otra parte, anotamos también su interés en los aspectos didácticos de la correlación entre técnica e historia: «El conocimiento de los procedimientos técnicos es imprescindible para tener una buena comprensión de un periodo determinado. Así, también el estudiante de historia del arte está obligado a estudiar la construcción abovedada».[16]

El resto de este extenso capítulo central prosigue con la división en sucesivos apartados con atención pormenorizada: la construcción abovedada romana, la bizantina, persa, islámica e india, la de la Edad Media, la del Renacimiento y Barroco y finalmente, la de nuestra época. Todo ello tal y como puntualmente queda reflejado en su índice. Las exposiciones tienen un carácter condensado dada la gran cantidad de material tratado (más de sesenta ejemplos solo en el apartado de Renacimiento y Barroco). Ello no significa, sin embargo, que no alcancen un interesante nivel crítico, y un ejemplo de ello puede ser la discusión sobre el Panteón de Roma. En ella muestra cómo la primera mirada cercana y analítica de Piranesi influyó en sus sucesores y cómo sus opiniones permanecieron bastante tiempo sin revisarse. En concreto, su conclusión sobre la existencia de múltiples niveles de arcos de descarga siguió sosteniéndose por Viollet-le-Duc, Canina y Choisy, y solo las investigaciones más detenidas de G. T. Rivoira (1925),[17] entre otros, mostraron que los arcos de descarga solo existen en la parte baja de la cúpula y no en los nive-

PLAAT 27. ONDERZOEK NAAR DE STABILITEIT VAN HET PANTHEON EN VAN DE BASILIEK VAN MAXENTIUS EN CONSTANTIJN TE ROME.

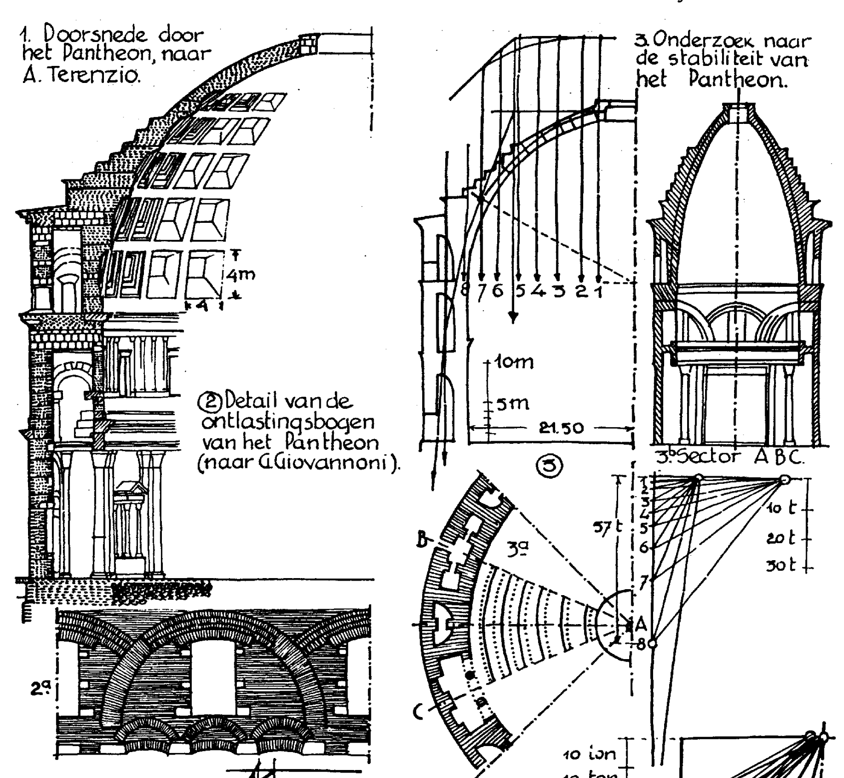


Figura 4
Panteón, análisis gráfico. *Gewelven*, Lám. 27

les superiores como venía suponiéndose. Muy bellas nos parecen asimismo las consideraciones sobre la utilidad y justificación de las nervaduras en el gótico, y particularmente, el análisis de las relaciones entre nervaduras en las bóvedas de las girolas en importantes catedrales francesas y alemanas. En su línea de no descuidar nunca los aspectos constructivos, también el mundo de las bóvedas renacentistas y barrocas es siempre tratado prestando gran atención a las soluciones de contrarrestos. En cuanto a estos últimos, destacaríamos el interés de su clarificadora exposición sobre materiales y sistemas de atirantado en ejemplos alemanes.

Naturalmente no faltan y se les concede amplia extensión a las grandes cúpulas históricas, que son tratadas con detalle. Aquí destacan Sta. Maria del Fiore de Florencia, con dos láminas exclusivamente dedicadas, pero sobre todo, las dos grandes cúpulas de San Pedro del Vaticano y San Pablo de Londres, consideradas por el autor como cimas de este arte constructivo y a las que dedica tres y seis láminas respectivamente. Éstas se continúan, entre otras, con el Panteón de París y una lámina sobre los Inválidos, con la que termina la serie de los ejemplos históricos. Los ejemplos son tan abundantes que es difícil notar ausencias, y solo tras cierto detenimiento se llega a echar en falta la inclusión de las grandes cúpulas otomanas o de las soluciones barrocas de Borromini.

En su parte final, este capítulo cuarto se completa con un último apartado referido a ejemplos modernos. Destaca en él, en primer lugar, el resurgimiento de las bóvedas nervadas asociado al neogótico, para dirigir su atención después a lo que denomina el influjo bizantino, si bien todo ello centrado en los ejemplos de autores neerlandeses. Dentro de ésta última influencia general, que impulsó la construcción de cúpulas a comienzos del siglo XX, distingue una primera tendencia marcada por el uso de elementos nervados o costillas con pantallas o láminas ligeras tendidas entre ellas y el más avanzado de la cúpulas-cáscara lisas de fábrica propiamente dichas. A esta segunda línea se aproximarían en los Países Bajos las ultimas experiencias de J. Cuypers (Iglesia en Beverwijk) y sobre todo las cúpulas de J. van der Valk con ligeras costillas ocultas en el extradós.[18] Como plenamente representativas de cúpulas-cáscara de fábrica hace también un explícito reconocimiento de las construidas por los Guastavino en EE.UU. y, aunque a escala menor, de diversos trabajos propios intercalados en las ilustraciones. Un testimonio de soluciones récord posibles con la técnica de abovedados es presentado finalmente con un proyecto de cúpula de cien metros de diámetro diseñada por el ingeniero Mäkelt.

El cierre de la obra lo pone el capítulo dedicado a la estabilidad de las bóvedas. Se trata en lo fundamental de un resumen práctico de aplicación del análisis por medio de la estática gráfica. En él vuelve a aparecer la esencia de su estilo sintético y didáctico plasmado en estudios de casos concretos que terminan en la descripción del cálculo gráfico de bóvedas de crucería y estrelladas. Su sentido práctico no impide, sin embargo, que mencione razonamientos teóricos de más alto nivel. Así, además de lo

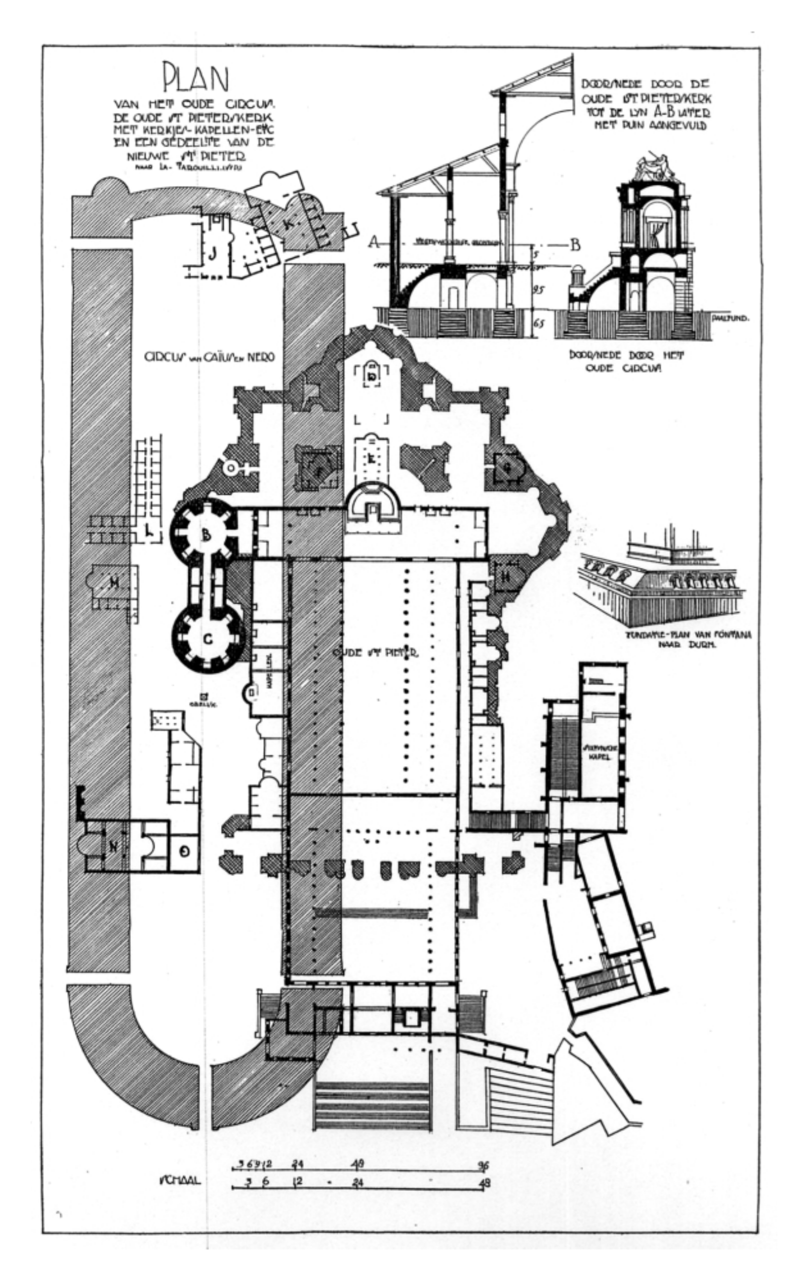


Figura 5

San Pedro, antiguo y nuevo, según Letarouilly, redibujado por Thunnissen. *Klei*, 1924, p. 215, lám. 4.

anterior, entra en consideraciones sobre la aplicación de la teoría elástica y cita el principio de estados de equilibrio por el que, si es posible al menos uno de ellos, éste se alcanzará realmente. Además, tanto la hipótesis funicular como la elástica son sometidas a críticas en virtud de sus imprecisiones, mencionando el método de deflexión como otra alternativa aplicable. El empleo de líneas de empujes pueden verse también en algunos ejemplos históricos a lo largo del libro.

El autor

En el artículo de G. Westerhout (1960) conmemorativo del setenta cumpleaños de Thunnissen aparecido en *Bowkundig Weekblad* (*BW*),[19] éste nos dice que su dedicación al tema de la construcción abovedada surgió por una especie de reto personal, «cuando en el verano de 1915 en su examen final de ingeniero le preguntaron si sabía algo de bóvedas, él tuvo que reconocer su ignorancia, pero posteriormente se dedicó tanto a paliar su carencia, que incluso ahora sigue prestando atención a su estudio, habiéndolo hecho crecer hasta convertirlo en un manual sobre bóvedas». Las intenciones se tradujeron desde luego en hechos y en realidad el interés de Thunnissen por el estudio de la construcción abovedada se hizo pronto visible en las publicaciones holandesas. Ya en 1924 apareció su primera aportación importante, con una serie de cuatro amplios artículos en la revista *Klei* sobre la iglesia de San Pedro de Roma.[20] En bastantes aspectos anticipó en ellos lo recogido después en su libro, aunque eran aún más extensos en cuanto a datos sobre su proceso histórico. A ellos les sucedió el año siguiente un largo estudio sobre la catedral de San Pablo de Londres en la misma revista.[21] Ambos son ya trabajos de envergadura con múltiples referencias comparativas a otras construcciones abovedadas y, por cierto, aún totalmente inéditos fuera del ámbito neerlandés. Otra notable contribución, aunque algo más tardía, fue su artículo obituario sobre J. Th. J. Cuypers, hijo del célebre constructor del Rijksmuseum, en el que ofrecía una documentada síntesis sobre su trayectoria y aportaciones a la construcción de abovedados modernos en Holanda.[22] Por otro lado, en ese mismo año ha de destacarse también su contribución a la *Historia general del arte* de la editorial De Haan de Utrecht, con su capítulo sobre la arquitectura del barroco alemán, también rico en referencias constructivas.[23]

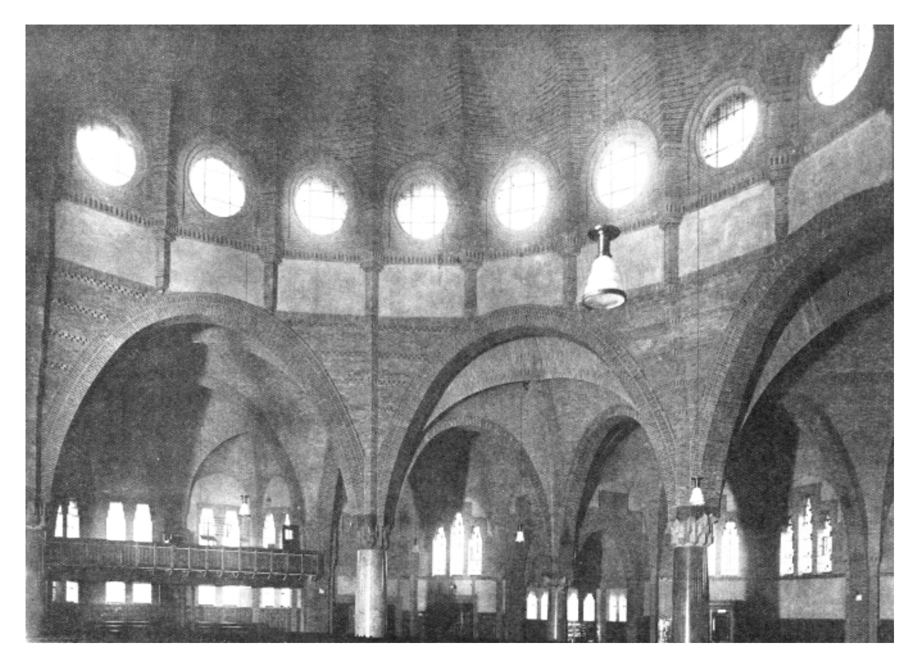


Figura 6
Iglesia en Beverwijk, Jos y Pierre Cuypers. Wattjes, Constructie van Gebouwen, 1927. Compárese con *Gewelven* lám. 127.

Aún después de la aparición de *Gewelven* en 1950, que fue precedida por algunos adelantos sobre su contenido en artículos publicados en *BW*, realizó alguna otra aportación de interés, como su artículo sobre la construcción de la cúpula de San Pedro con motivo del año santo (1950)[24] o el dedicado en 1953 a la arquitectura religiosa de J. Th. J. Cuypers y Jan Stuyt, figuras clave en el resurgir del abovedado en su país.[25] No obstante, y como una cierta culminación de sus trabajos en éste ámbito han de destacarse sus dos artículos de 1955 dedicados a la restauración de la iglesia del Santo Sepulcro de Jerusalén publicados respectivamente en *BW* [26] y *Katholiek Bouwblad* (*KB*).[27] Estas dos últimas referencias correspondían a informes de los trabajos llevados a cabo por una comisión internacional creada para estudiar el preocupante estado de tan célebre edificio. Para ella se formó un grupo de especialistas de Francia, Bélgica, Italia,

Inglaterra, Estados Unidos y España teniendo a Thunnissen como único representante neerlandés, el cual además ejerció la labor de presidente. Por España, se destacó la figura del «aún joven, pero ya cobrando importancia, Don Miguel Fisac».[28]

Todo lo mencionado se limita a sus publicaciones más importantes sobre arquitectura abovedada, pero en realidad su producción escrita como articulista es mucho más extensa. Para dar de ella al menos una idea general puede citarse que ya desde 1923 se pueden encontrar otros trabajos de importancia, como por ejemplo su extensa reseña del libro *Indische Baukunst* (Arquitectura india) del basilés Emanuel La Roche editado en Munich[29] o, al año siguiente, otra notable serie de artículos sobre construcción de ladrillo en Inglaterra,[30] con un total de ciento veinte páginas, amén de diversas reseñas, ya mas breves, de libros de actualidad. Como mínimo, hasta 1928 sigue colaborando en la revista *Klei*, a la cual pertenecen las referencias citadas. Por otra parte, sólo en la revista *BW* y en el periodo 1952-55 aparecieron otras once colaboraciones de distinta extensión incluyendo dos informes relativos a la Federación de Arquitectos Neerlandeses (BNA) y una serie de artículos cortos con comentarios sobre algunos ejemplos llamativos de arquitectura extranjera popular o antigua. Son de mencionar, entre ellos, uno dedicado a la cúpula de la catedral de Pistoia[31] y otro a cúpulas nervadas en Ávila y Burgos.[32]

Aunque tampoco exhaustiva, la búsqueda de colaboraciones por otras revistas revela también bastantes entregas en *Bouw* y en *Katholiek Bouwblad*, repartiéndose entre temas tan variados como comentarios de obras recién terminadas de otros arquitectos, reseñas de libros, un estudio sobre la patente de un sistema de construcción prefabricada para viviendas, otro sobre carpinterías de madera, un informe de viaje a Estados Unidos, la titulación de arquitecto y el ejercicio profesional, restauración de iglesias antiguas y construcción de nuevas, carpinterías y construcción artesanal o curiosidades en ejemplos de escultura y arquitectura eclesiástica antigua de muy diversas procedencias. En relación con las construcciones de fábrica merece citarse también su artículo dedicado a las torres, utilizando para su estudio ilustraciones de Viollet-le-Duc.[33]

Las referencias anteriores revelan una personalidad de amplios intereses y con gran vocación por el estudio, pero a su vez muy involucrada en el mundo profe-



Figura 7
Almacenes Peek en Cloppenburg, La Haya.

sional de su época. En efecto, Hendricus Johannes Wilhelmus Thunnissen, nacido el 19 de junio de 1890 y graduado con el título de ingeniero civil en Delft en enero de 1915, fue un arquitecto en ejercicio relativamente destacado, desarrollando una carrera de cierta extensión, marcada principalmente por una arquitectura de corte tradicionalista muy cercana a la denominada escuela de Delft, liderada por el catedrático católico Granpré Molière, el cual escribirá el prólogo de *Gewelven*. Una parte significativa de su obra fue de carácter religioso, aunque también con notables realizaciones de arquitectura sanitaria y comercial, a la que se sumaría un cierto número de ejemplos de arquitectura residencial, fundamen-

talmente villas unifamiliares. Entre ellas la suya propia en la Carel van Bylandtlaan de Haya, hoy destruida, y en la que fundó su estudio profesional en 1916. Thunnissen estuvo asociado hasta 1940 con J. P. L. Hendriks, conocido entre otras cosas por su victoria en un concurso de depósito elevado para Wassenaar en 1928 que, por su imagen tradicional, creó una célebre polémica entre los arquitectos funcionalistas.[34] Ya después de la guerra se asoció con su yerno, el también ingeniero Anton van Kranendonk y desde 1952 con su propio hijo André. Falleció el 3 de octubre de 1978.[35] En cuanto a su vinculación a instituciones profesionales, ocupó el puesto de presidente del BNA (Asociación neerlandesa de arquitectos) desde 1956 a 1959, lo que justifica sus artículos sobre temas corporativos, siendo también redactor de la revista *Klei*, al menos desde 1923.[36]

La mencionada vocación por el estudio se manifestó también en cierta actividad docente, que aunque no parece que se prolongara mucho en el tiempo, fue impartida en una institución de reconocido prestigio. Thunnissen fue entre 1948 y 1950 profesor en la Academia de Bellas Artes de Rotterdam, que a su vez formaba parte de la Academia de Arquitectura de Amsterdam, y en la que se daban dos de los tres cursos del programa VBO (Estudios avanzados de arquitectura). Su cometido fueron diversas conferencias sobre la materia «Sistemas constructivos». No ha sido posible, no obstante, determinar si también dio clases en el curso 1947-48, lo cual pudo ocurrir, según informaciones familiares, y también queda por confirmar si llegó a ejercer alguna actividad docente en Tilburg. El curso VBO, incluía un amplia oferta de materias y entre ellas estuvieron las de «vivienda y barrio residencial» impartida por J. B. Bakema, «proyectos arquitectónicos» por Van den Broek, H. A. Maaskant, G. Th. Rietveld y A. van der Steur y «urbanismo» por W. van Tijen.[37]

Como edificios destacados de Thunnissen, Westerhout cita los siguientes: «Ursula en Nieuwveen, Peek y Cloppenburg en la Haya, Residentiebode, Groenmarkt en la Haya, el gran hospital psiquiátrico de Heiloo cerca de Alkmaar, algunas iglesias, entre ellas la Mariakerk en Nijmegen, la Sacramentskerk de Delft, el liceo femenino de La Haya, la escuela secundaria católica de Leiden y casas de campo en Breda, Sittard, Almelo, Bergen op Zoom y Udem (Uedem, Alemania)».[38] La lista no es, desde luego, completa y algunas de las referencias no son fáciles de localizar. Ursula era un instituto psiquiátrico de cierta envergadura en Nieuwveen-Was-

senaar, publicado en *BW* en 1940 y hoy destruido, y el hospital de Heiloo es el destacado complejo sanitario Willibrord, todavía existente en buenas condiciones y realizado entre 1937 y 1940. La Sacramentskerk de Delft (1938) también se encuentra en perfecto estado. Respecto a su arquitectura doméstica, otra casa de campo en Zandvoort aan Zee, aparece también publicada en *BW* en 1925.

No obstante, son de ayuda también los datos complementarios suministrados en la página web del NAi y extraidos del *BONAS werkdocument* sobre Hendricus Johannes Wilhelmus Thunnissen (sr.) y André Wilhelmus Petrus Thunnissen (jr). Según dicho documento, el liceo de la Haya, (1930) se situó en la Louis Couperplein, y la escuela de Leiden (1939) en la Mariënpoelstraat, reflejando ambos una clara tendencia católica; la casa «Steinbergen» en Uedem, de 1918, aun dentro de un estilo «zakelijk» campestre, poseía una abarca-

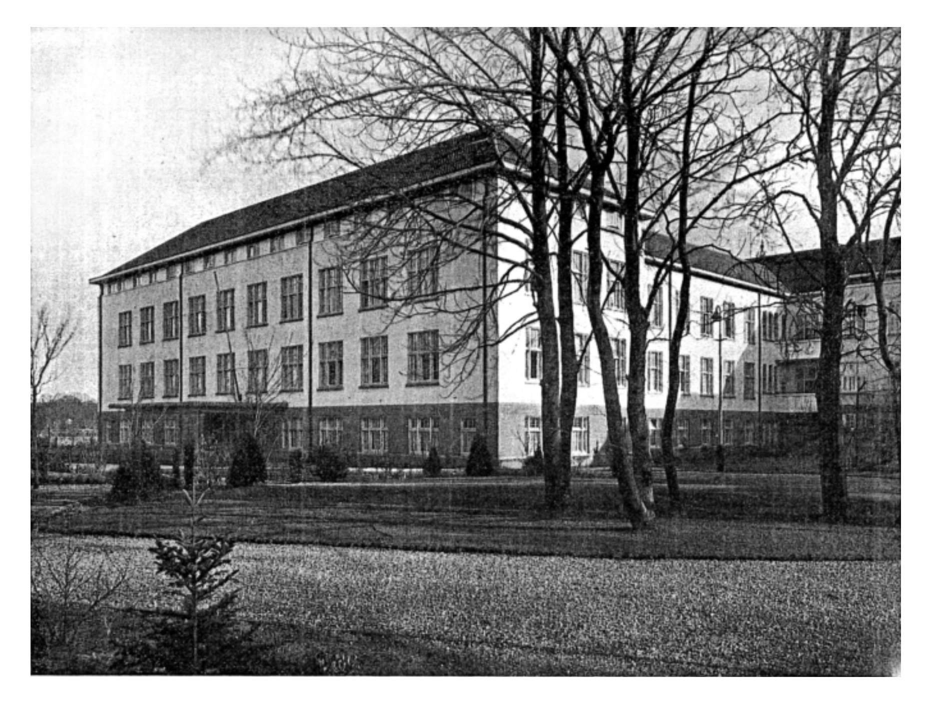


Figura 8
Clínica de neurocirugía St. Ursula, Wassenaar. Simons, Thunnissen y Hendricks. *BW*, 1940 p. 367.

dora cubierta de brezo. En cuanto a Peek en Cloppenburg, son unos notables grandes almacenes de confección y moda en la Grote Marktstraat de la Haya, aún existentes y recogidos por su bóveda de cristal y hormigón, aunque con adscripción errónea, por Wattjes en su tratado de construcción.[39] A todo ello, y a partir de consultas en revistas, se pueden añadir también algunas realizaciones de última época, todas ellas de carácter religioso, como la colaboración en la iglesia Goede Herder (Buen Pastor) en Laren, publicada en *BW* en 1957 y firmada por Granpré Molière con participación de H. J. W. Thunnissen, A. van Kranendonk y A. W. P. Thunnissen; una parroquia en Dordrecht publicada en *BW* en 1953 y otras dos iglesias en el Noordoostpolder, publicadas así mismo en *BW* en 1957, y diseñadas estas tres últimas en exclusividad por su estudio. Finalmente, una última iglesia bastante destacable, pero ya de líneas más modernas, fue la Don Bosco-kerk en Alkmaar, presentada en 1962 en *BW*, y todavía con su firma dentro del estudio.

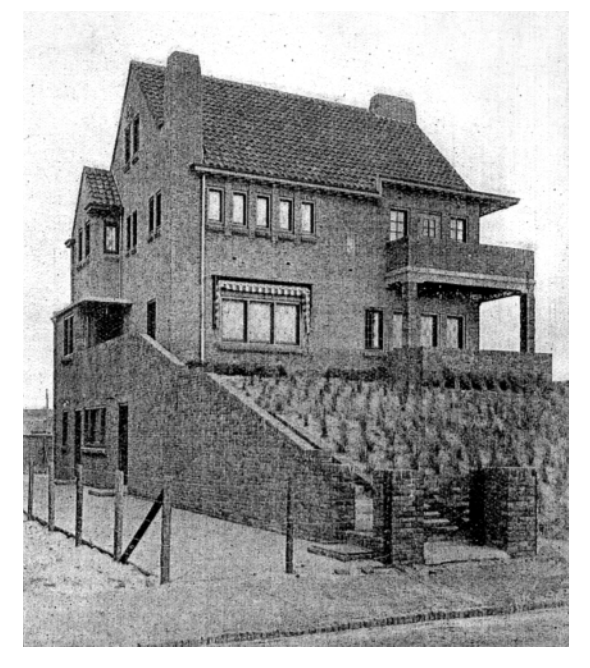


Figura 9
Casa frente al mar, Zandvoort aan zee. Thunnissen y Hendricks. *BW*, 1925 p. 427.



Figura 10
Sacramentskerk, Delft.
H. Thunnissen.

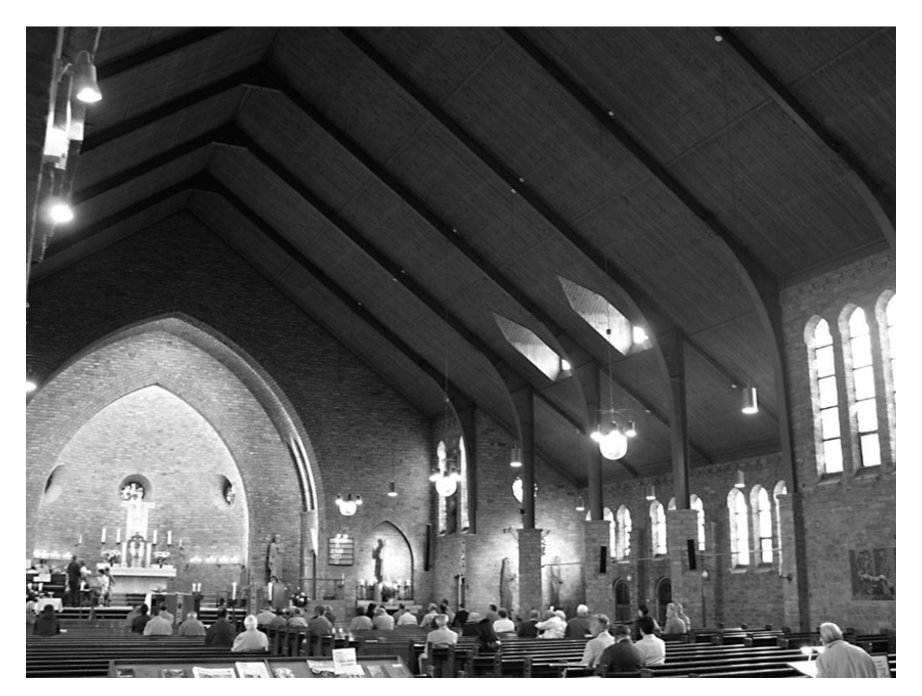


Figura 11
Sacramentskerk, Delft, interior

En cuanto a construcción de bóvedas, algunos de sus edificios contienen realizaciones de bastante interés, estando incluidas dentro de su libro. A destacar en primer lugar sería la abadía benedictina de Tegelen proyectada por H. Stoks pero con bóvedas parabólicas diseñadas por Thunnissen.[40] La iglesia de Nuestra Señora de Lourdes en Nymegen y segunda de las recogidas en *Gewelven*,[41] fue iniciada en 1922 ampliándose después según proyecto de 1946. H. Thunnissen autor de los dos proyectos para esta misma iglesia, destacó en ella la calidad del trabajo de sus abovedados, hecho posible gracias a la habilidad de sus operarios.[42] De la antes citada Sacramentskerk (1938-40), interesante por su interior con uso mixto de madera, acero y fábrica de ladrillo, sería de mencionar el ábside, recogido sin citarlo en el libro (lám. 122). Finalmente, su realización más notable en este ámbito fue la cúpula de la capilla del hospital St. Willibrord de Heiloo, iniciada en 1937 e inaugurada en 1940. Con un diámetro de 20 m está soportada por 12 esbeltas columnas de hormigón sobre las que un anillo también de hormigón se encarga de las tracciones. La cúpula en sí, totalmente en ladrillo y sin nervios, oscila su espesor desde 22 cm en la base a 11 en la coronación. Dada su importancia es recogida en una lámina completa (lám. 133) y varias fotografías, que muestran su proceso de construcción y una vista interior.

La asociación con su hijo y su yerno dio por resultado, como dijimos, un pequeño grupo de iglesias más tardías en cuanto a su realización. Para ellas siguieron utilizando el ladrillo como material preferente. Sin embargo, son ya muestras de la transición hacia nuevas técnicas en las que el hormigón fue cada vez más protagonista. Como eslabones finales, fueron soluciones en las que la antigua reflexión y estudio de los tipos tradicionales fue adaptada a nuevos tiempos y materiales. Quizás también por esta condición merecerían, como su libro y los abovedados en general, participar del interés que afortunadamente parece renacer hacia tan esenciales métodos constructivos. *Gewelven* es, sin duda, un notable y altamente ilustrativo compendio de dichos medios, realizado habiendo alcanzado su autor la plenitud de su carrera, tras cumplir los sesenta años. Es por tanto, una obra fruto de la madurez y la experiencia y ello, si cabe, nos predispone aún más a recomendarla y a destacar a Thunnissen como figura digna de un merecido reconocimiento y difusión.

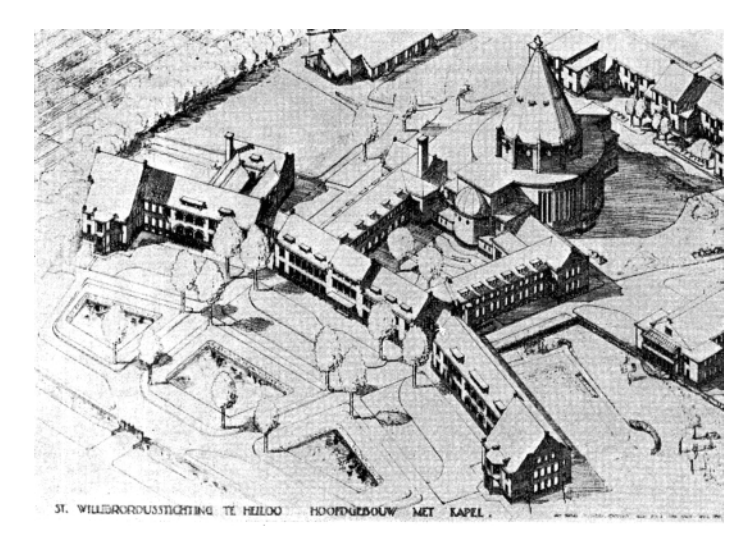


Figura 12
St.Willibrord, Heiloo. H. Thunnissen. *BW*, 1960, p. 304.



Figura 13
St. Willibrord, Heiloo. Capilla

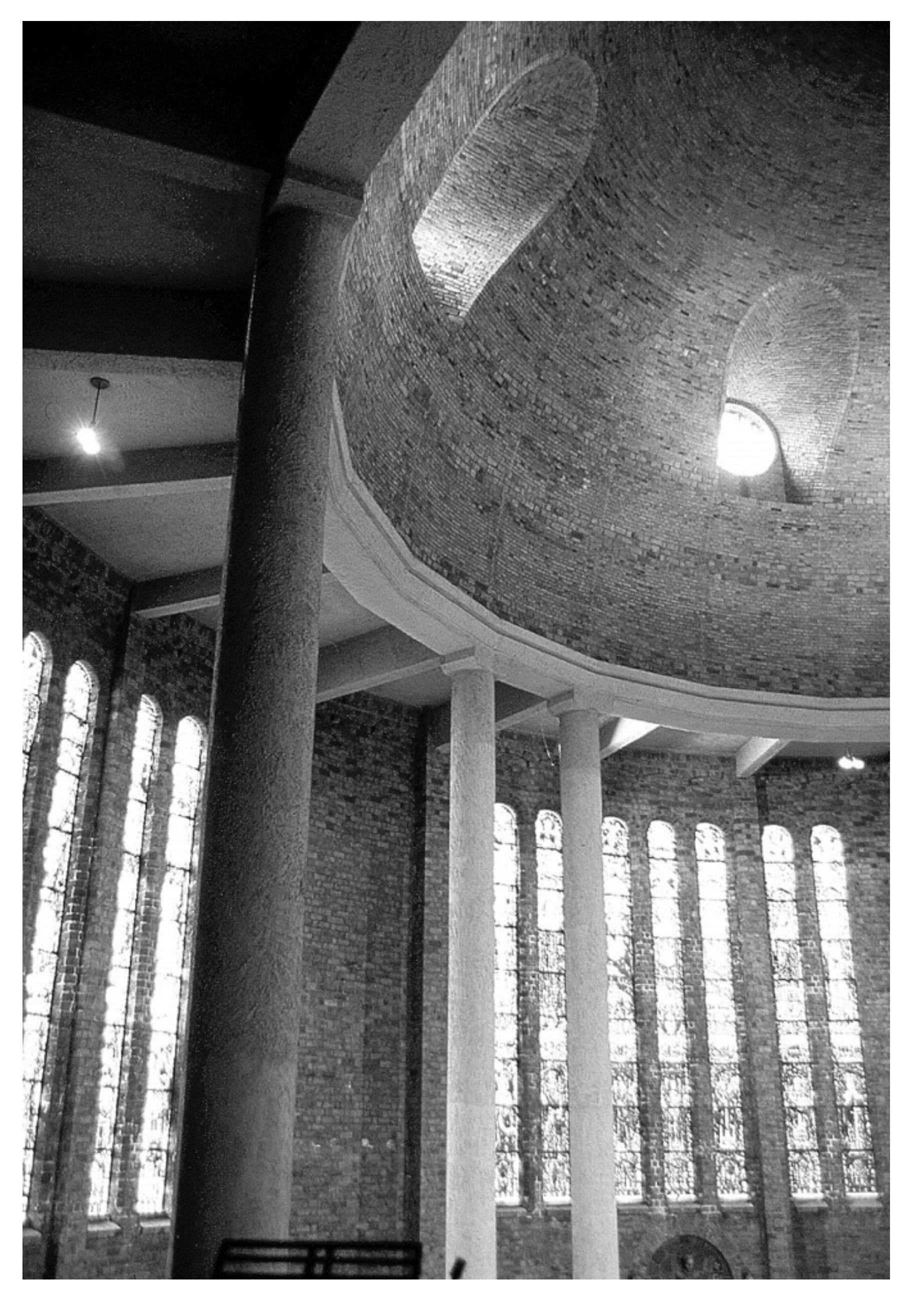


Figura 14
St. Willibrord, Heiloo. Interior

Notas

1 Entre las revistas destacadas del momento sólo *Forum* no hizo ninguna referencia al libro. Del resto, *Bouwkundig Weekblad* lo hizo con una amplia reseña de su director J. P. Mieras («Gewelven», 1951, pp. 315–6), *Bouw* con comentario de Abspoel («Gewelfbouw», 1952, p. 859) y *Katholiek Bouwblad* con el firmado con las iniciales A.S. («Gewelven», vol. 20, 1952–53, pp. 407-9).

2 Thunnissen, H. J. W. *Gewelven. Hun constructie en toepassing in de historische en hedendaagse bouwkunst*. Amsterdam, J. Ahrend & Zoon, 1950, vii [3]. En adelante los números entre corchetes refieren a páginas de la presente edición.

3 Dentro del panorama neerlandés sobre construcción abovedada es de bastante interés, asimismo, lo contenido en el volumen «Vloeren, plafonds, gewelven en trappen» de la obra previamene editada de J. G. Wattjes, catedrático de la Escuela Técnica de Delft, *Constructie van Gebouwen*, Amsterdam, Kosmos, 1927. En ella se ofrece también un detallado estudio de estas construcciones, igualmente con especial atención a las realizaciones holandesas, pero sin la pretensión abarcadora de carácter histórico de *Gewelven*.

4 Sobre el abandono de la construcción con bóvedas son así mismo interesantes los razonamientos de Granpré Molière en el prólogo: «Pero el hecho es que esta regia manera de construir ha sido relegada a un último plano… No suena muy amable, pero me parece que la razón principal es que ya no nos atrevemos. Ni técnicamente y estéticamente. Técnicamente porque demanda la madurez de constructores experimentados, y estéticamente porque en los siglos precedentes se ha manejado con tal maestría que en muchos aspectos parece difícil de mejorar, y eso es lo que exige la ley del progreso.» Thunnissen, *Gewelven*, v. [2]

5 Aunque Thunnissen fue profesor de arquitectura y construcción durante algún tiempo, dicha actividad se desarrolló con certeza solo a partir de 1948, es decir cuando ya el libro estaba muy avanzado en su gestación. Además, la enseñanza por él impartida no tuvo por objeto exclusivo la construcción abovedada. Ver más adelante en el texto en relación a su actividad docente.

6 Dichas referencias se han revisado completamente para la edición española, precisando y completando todos los datos de la edición original. Lo mismo se ha realizado en las entradas de la bibliografía final.

7 Thunnissen, *Gewelven*, p. 1 [5].

8 Cotejado con lo recogido anteriormente por Wattjes en este apartado, ver nota 3, existen bastantes coincidencias, aunque la agrupación de contenidos y el tratamiento sintético de Thunnissen lo hacen más asequible y compacto frente a la mayor extensión de Wattjes. Solo Thunnissen ofrece referencia de las fuentes manejadas.

9 Thunnissen, *Gewelven,* p. 58 [70].

10 Ibid.

11 Ibid., p. 59 [72].

12 Ibid., p. 60 [72].

13 Ibid., p. 61 [73].

14 Ibid., p. 69 [84].

15 Ibid.

16 Ibid., p. 70 [84].

17 Rivoira, G. T. *Roman architecture and its principles of construction under the empire*. 1925.

18 Un estudio general de bóvedas de fábrica holandesas modernas puede verse en J. Tomlow, «Dr. Pierre Cuypers & Sohn & Co. und ihre Rolle bei der Entwicklung vom Gewölbe zur Schale in den Niederlanden um 1900». *Architectura*. Vol. 27, 1997, pp. 40-60.

19 Westerhout, G. «Henri Thunnissen 19 juni 70 jaar», *Bouwkundig Weekblad*, 1960, n.13, pp. 304-5.

20 Thunnissen, H. J. W. «De St. Pieterskerk te Rome», *Klei*, 16 jaargang, 1924, n.16, 15 augustus, n.17, 1 september, n.18, 15 september y n.19, 1 october.

21 Thunnissen, H. J .W. «De ST. Paul´s Kathedraal te Londen», *Klei*, 17 jaargang. n. 11, 1925, 1 juni, pp. 145-164.

22 Thunnissen, H. J. W. «Ir. J.Th.J. Cuypers†», *Bouw*, 1949, pp. 146–49.

23 Thunnissen, H. J. W. «Duitsland 1600–1800». I. Bouwkunst, Deel V, Hoofdstuck VII, *Algemeen Kunstgeschiedenis*, Utrecht, De Haan, 1949.

24 Thunnissen, H. J. W. «De constructie van de koepel van de St. Pieter te Rome», *Katholiek Bouwblad*, Jaargang 18, 1950-51, separata año jubilar, pp. 61–65.

25 Thunnissen, H. J. W. «Kentering in het Architectuurinzicht», *Katholiek Bouwblad*, Jaargang 20, julio 1953, n.20, pp. 305–314.

26 Thunnissen, H. J. W. «Restauratie van de H. Grafkerk in Jeruzalem», *Bouwkundig Weekblad*, 1955, n. 42, pp. 466–7.

27 Thunnissen, H. J. W. «De Kerk van het Heilig Graf te Jeruzalem», *Katholiek Bouwblad*, Jaargang 23 (1955–56), n. 7, 31 december 1955.

28 Thunnissen, «Restauratie…», *Bouwkundig Weekblad*, 1955, p. 466.

29 Thunnissen, H. J. W. «Indische baukunst». *Klei*. 15 jaargang, 1923, pp. 78–82 y 97–101

30 Thunnissen, H. J. W. «Baksteenbouw in Engeland», *Klei*, 16 jaargang, 1924, pp. 7–127.

31 Thunnissen, H. J. W. «Koepel te Pistoja», *Bouwkundig Weekblad*, 1955, n. 8, pp. 93–5.

32 Thunnissen, H. J. W. «Wonderlijke Steenconstructies», *Bouwkundig Weekblad*, 1955, n.9, p. 105.

33 Thunnissen, H. J. W. «Torens hoogtepunten van architectuur», *Katholiek Bouwblad*, Jaargang 18 (1950-51), pp. 249–253.

34 Cor van Eesteren. «Naar aanleiding van de prijsvraag voor een watertoren te Wassenaar», *i10*, 1927, n. 8-9, pp. 287–9.

35 Datos ofrecidos personalmente por su hijo André Thunnissen, nacido en 1921 y actualmente residente en la Haya. Según su información, Henri Thunnissen inició la preparación del libro en 1941, fecha en la que contactó con el editor, finalizándolo en 1949. Como motivaciones principales cita la inexistencia en holandés de algún libro razonablemente completo sobre el tema y la falta de actividad durante los años de la guerra. Esta información ha sido ampliada por su nieta Claudia Thunnissen en la nota adjunta enviada en julio de 2011 y que se publica a continuación.

36 Entre los redactores de la revista neerlandesa *Cement* figura desde su fundación en 1949 W. J. H. Thunnissen, es decir con las mismas iniciales que Henri Thunnissen pero cambiadas de orden, por lo que no es segura su identidad. Quedaría por comprobar si pudo formar parte algún tiempo en la redacción de *BW*, *Bouw* o *BK* dada la frecuencia de sus colaboraciones en determinados periodos.

37 Datos suministrados por Clara Thunnissen, nieta del autor y en parte recogidos en el *Jaarverslag van de Academie van Beeldende Kunsten*, Rotterdam.

38 Westerhout. «Henri Thunnissen...», *Bouwkundig Weekblad*, p. 305.

39 Wattjes, «Vloeren, plafonds, gewelven en trappen», p. 142, fig. 323, indica para dicha bóveda, incluida en su apartado de bóvedas de cristal y hormigón, la referencia Val St. Lambert. Sin embargo una enmienda a mano en el ejemplar consultado en la biblioteca de la escuela de Delft la tacha y corrige: «edificio Peek en Cloppenburg la Haya. Arch ir. H. Thunnissen».

40 Thunnisen. *Gewelven*, lám. 119.

41 Ibid. láms. 120–1

42 Thunnissen, H. J. W. «De gedeeltelijke afbouw van de kerk van O.L. Vrouw van Lourdes te Nijmegen», *Katholiek Bouwblad*, Jaargang 17, 1950, n.13, 1 april, p. 194.

Nota biógráfica sobre H. Thunnissen

por Claudia Thunnissen

Como nieta del arquitecto Henri J. W. Thunnissen me siento honrada de que su libro *Gewelven* se incluya en la serie del Instituto Juan de Herrera. Mi abuelo fue un hombre afable, un agradable conferenciante y un investigador. No fue solamente un arquitecto que desarrolló su especialidad en el campo de la construcción abovedada, que aplicó también en su propios trabajos, sino que junto a ello escribió regularmente en revistas profesionales entre las cuales estuvieron *Katholiek Bouwblad*, *Bouwkundig Weekblad*, *Gildeboek* y *Klei*. En 1949 escribió un capítulo sobre la arquitectura barroca alemana en la serie de seis volúmenes *Algemene Kunstgeschiedenis. De Kunst der Mensheid van ousdste Tijden tot Heden* a cargo del profesor F. W. S. van Thienen. Un año después salió a la luz *Gewelven*.

La génesis de *Gewelven* está ligada a la Segunda Guerra Mundial. En 1942 la autoridad de ocupación alemana estableció la llamada «Nederlansche Kultuurkamer». Esta organización profesional de artistas constaba de seis ramas. En la sexta estaban incluidas la Arquitectura, las artes plásticas y los oficios artísticos. El objetivo de la organización era propagar las ideas del nacionalsocialismo a través de los sectores artísticos. La afiliación era obligada y se tenía que enviar una declaración de pertenencia a la raza aria. Quien no firmaba, no podía ejercer su profesión.

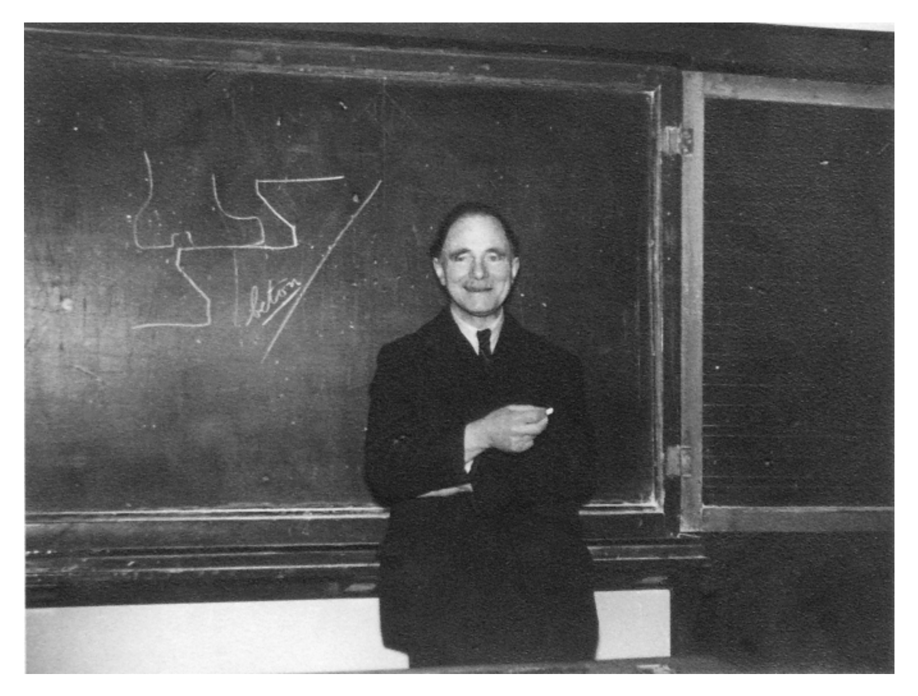


Figura 1
H. Thunnissen impartiendo clase

Mi abuelo fue uno de los arquitectos que se negó. Y eso significó que dejó de tener trabajo. En ese año comenzó con la redacción de *Gewelven*. Cada día venía el jefe de estudio, el señor Van de Hof, a la Carel van Bylandtlaan 6 de la Haya, en donde, tanto el estudio como la vivienda de la familia Thunnissen estaban ubicados. El jefe de estudio dibujaba las construcciones abovedadas del libro abajo en la oficina, mientras que mi padre André y su hermana Lia preparaban dibujos a línea arriba en la vivienda. Lia estudiaba en la Academia de Arte de la Haya y mi padre acababa de empezar sus estudios en la Escuela Técnica de Delft.

Era una especie de empresa familiar en tiempo de guerra. A mi abuela le parecía estupendo.

En 1943 mi padre fue detenido por los alemanes y enviado a un campo de concentración, pero mi tía y el señor Van de Hof continuaron trabajando en el libro. Este último, sobre todo, realizó una gran contribución. Después de la guerra

el trabajo de proyectos volvió de nuevo al estudio. Cinco años más tarde encontró mi abuelo la oportunidad de publicar *Gewelven*. Fue considerado como un trabajo de referencia.

Quiero dar las gracias, junto a mi padre André, a Rafael García por su dedicación y entusiasmo en traducir y colaborar en la publicación de este libro en español.

Prólogo de la primera edición

El maestro constructor tiene en una mano la vida material, en la otra la espiritual. En él se reúnen práctica con contemplación, apariencia y esencia, ciencia y arte, trabajo y alegría del trabajo, sociedad y civilización. No es poco. Y ciertamente no en nuestro tiempo. Ya que es justamente por la ruptura entre ambas por lo que la fuerza espiritual se vacía en nuestros días y por lo que ocurren las catástrofes que nos amenazan y abruman. Pero la arquitectura cura y une, hace de estas fuerzas su esencia. Y si el construir dejara de llevar esto a cabo, entonces la arquitectura dejaría de ser. Por eso el arte de construir debe ser fomentado en nuestros días. Y por eso se hace merecedor de comentario y recomendación todo lo que la arquitectura ennoblece y con ello el mundo emprendedor y la vida cultural en su conjunto. Este es el propósito de este prólogo.

La construcción de bóvedas es un campo propio dentro de la construcción. Tiene una manera constructiva propia, tiene una belleza propia. En todas las partes donde hay construcción abovedada conlleva una nueva forma que hasta cierta medida determina el estilo de construir, y esto vale en especial para los sucesivos grandes estilos de Occidente. Sin embargo ya no vale para nosotros. Y la pregunta que surge es si el arte de las bóvedas no es ya definitivamente anacrónico, y cuál puede ser la razón. Con seguridad no es porque ya no sean justificables económicamente; y tampoco porque los nuevos materiales y construccio-

nes no hubieran abierto aquí nuevos caminos; o porque la mecánica ya no hubiera encontrado ningún valioso campo; y desde luego no porque se hubieran agotado todas las posibilidades formales. Nada de todo eso.

Pero el hecho cierto es que esta regia manera de construir ha sido relegada al último plano. A la periferia de hangares de aeropuertos, iglesias rurales y barracas para manifestaciones de masas. Ciertamente hay muchas razones para ello. Pero la principal me parece que es de naturaleza negativa. No suena muy amable decirlo pero la razón principal me parece que es porque ya no nos atrevemos. Ni técnicamente ni estéticamente. Técnicamente porque demanda la madurez del maestro constructor experimentado, y estéticamente porque en los siglos precedentes se ha manejado con tal maestría que en muchos aspectosparece difícil de mejorar, y eso es lo que exige la ley del progreso.

Se me antoja que de lo que esta situación negativa proviene es principalmente de la impotencia. Impotencia y temor. Aquí tiene lugar un proceso de represión. Nuestros patólogos han indagado muy inteligentemente los efectos y consecuencias de esto para la vida individual en su origen. Pero es también un fenómeno general, una enfermedad del alma social, por así decir. El gran Cuypers, que apenas tuvo problemas con las inhibiciones, quiso llamar otra vez a la vida al pasado y con ello también a la construcción abovedada. Pero dicho con todo respeto, esa nueva vida recibió sin embargo un poco el sabor de las conservas. Y por eso uno se arredra de nuevo. A la larga esto no puede permanecer así.

La nueva cultura es multiforme y no se puede prescindir por mucho tiempo de la bóveda, esta respetable hija de la familia de los motivos de la construcción. Tiene, como ya se ha dicho, propiedades estéticas y constructivas que sólo a ella le incumben. Estéticamente, porque la bóveda muestra un contraste casi contradictorio con la pared. Esto es así porque la pared es parte del muro plano, pero la superficie arqueada de la bóveda es una parte del espacio. Está determinada internamente, en oposición al muro, que tiene una determinación externa. Por eso, uno se pregunta por el espesor del muro; no se pregunta, estéticamente hablando, por la sección de la bóveda.

La bóveda es la coronación del espacio, y es suficiente. Aquí y también solo aquí, encuentra su lugar la bóveda de cáscara, la que a nuestros jóvenes tanto fascina. Por la existencia de estos contrastes está predestinada para la celebración de

un matrimonio con el muro. Con ello surge, incluso para la propia composición arquitectónica, un orden de partes cargando una sobre la otra y, por eso, unidas armónicamente, hacen expresivo el aspecto inerte del material, su peso y resistencia. Seguidamente está, además, este parecido con nuestra vida; que la construcción abovedada no se puede erigir ni mantener sin colaboración. Me refiero aquí al empuje lateral, para el que la bóveda demanda compañía, reuniéndose en torno a ella una corte completa de formas constructivas y espaciales, como una familia sobre la que reinara.

Estos son elementos de gran valor estético, reclamados por la misma naturaleza de la construcción abovedada y que el tiempo no puede desgastar. Pero hay también propiedades constructivas, que van aparejadas exclusivamente con ella y que parecen prometerla un futuro. Estas son sobre todo la cubierta de grandes espacios sin puntos de apoyo molestos, y es sabido que ciencia y técnica en este aspecto han progresado a saltos. La construcción de puentes y hangares es la que más se ha beneficiado de ello. El ingeniero queda libre de la preocupación que aquí todavía retiene al arquitecto.

¿Cuál debe se la consecuencia de ello? Que los dos complementos del construir, digamos la técnica y el arte, que en ninguna parte están tan íntimamente unidos como en el espacio y la construcción, son igualmente determinantes en la construcción abovedada – aunque también en este terreno van extrañándose cada vez más el uno del otro.

Ojalá pueda resultar de todo esto, cuán esencial es recuperar este atraso. Y si la causa más profunda ha consistido realmente en la ignorancia, tal como he supuesto, entonces puede esperarse que mucho de bueno saldrá de un estudio fundamentado, claro y completo sobre este asunto. Tal estudio es ahora ofrecido aquí por primera vez con esta dimensión. Ya que, cabría preguntarse si existía algo en esta materia que pudiera compararse con la síntesis de este libro desde los puntos de vista históricos, constructivo, técnico y de diseño. Estamos, por tanto, ante palabras mayores y por eso no me extrañaría si este texto, con su costosa documentación y análisis, llegara a ser elogiado como el trabajo estándar en este campo de la arquitectura.

M. J. Granpré Molière

Introducción

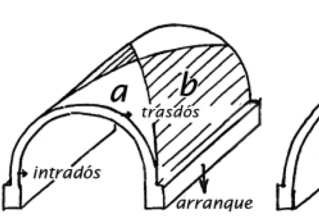
Se entiende generalmente por bóvedas, construcciones arqueadas o en forma de cáscaras para cubrir un espacio libre, en las que en la medida de lo posible están excluidas tensiones de tracción en los materiales empleados (excepto en las construcciones de hormigón armado). Pueden estar hechas tanto de piedra como de ladrillo, hormigón, cristal o cascote, así como de madera. Nos limitaremos en nuestras consideraciones principalmente a las bóvedas realizadas en ladrillo o piedra (Láms. 1, 2).

La erección de bóvedas está entre las técnicas más antiguas; los más importantes monumentos de arquitectura han sido cubiertos con bóvedas. Por eso para una buena comprensión del cómo y el porqué de la arquitectura de los siglos pasados es imprescindible su estudio.

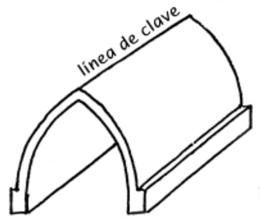
No hay parte de la técnica de la construcción en la que más tenga que ser consultado el sano entendimiento, en la que jueguen un papel más grande la experiencia y la maestría que con el proyecto y ejecución de las bóvedas. Las bóvedas no pueden ser vistas como partes en sí mismas. Se mantienen unidas de manera en extremo íntima al resto de la construcción; cargan los muros y las columnas, que deben ser adecuadamente cimentados si se quiere que la bóveda se mantenga sana. La bóveda ejerce empuje lateral, y este empuje tiene que ser contrarrestado por fábrica dispuesta de forma expertamente organizada.

La bóveda lleva a cabo la noble función de cubrir amplios espacios con piezas de pequeño tamaño, con lo que se ofrece una visible muestra de la sabiduría del maestro, que triunfa sobre la materia. Los numerosos problemas que se presentan en el estudio de la construcción abovedada se pueden casi siempre reducir a los de carácter geométrico, constructivo o estético. En breve hablaremos de estos problemas.

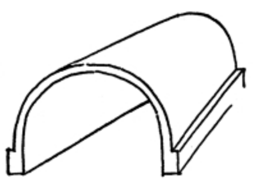
LÁMINA 1. TIPOS DE BÓVEDAS

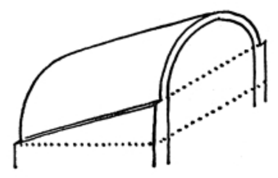


1. Bóveda de cañón



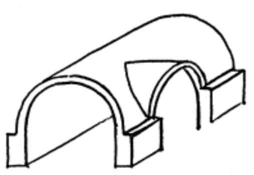
2. Bóveda de cañón apuntada


3. Bóveda de cañón oblicua

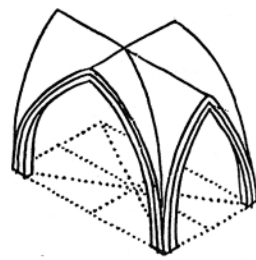

4. Bóveda de cañón rampante

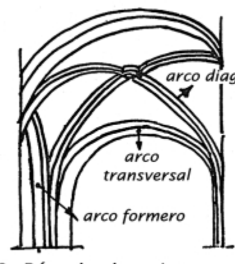
7 y 8. Bóvedas de arista o crucería


5. Bóveda de cañón anular

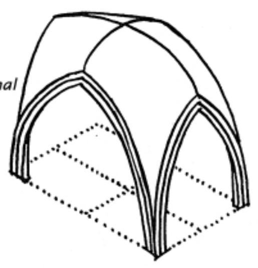

6. Bóveda de cañón con luneto

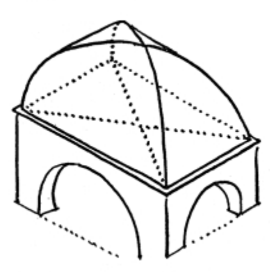

7. Intersección de dos bóvedas de cañón como en nº 1

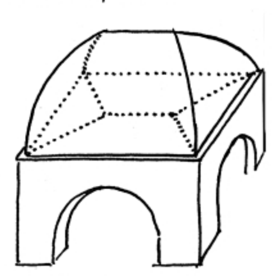

8. Idem tipo nº 2

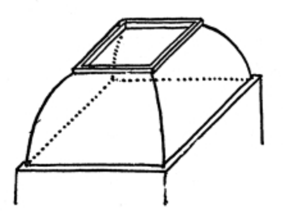


9. Bóveda de arista con nervaduras (vista inferior)

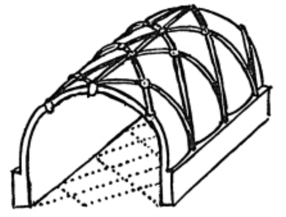

10. Bóveda en rincón de claustro truncada

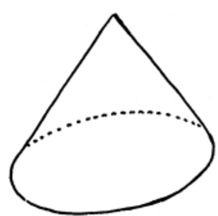

11. Bóveda en rincón de claustro

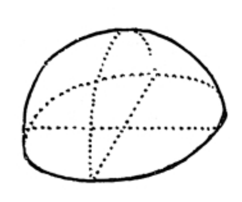

12. Bóveda esquifada

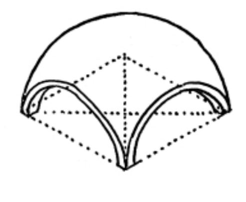

13. Bóveda de artesa

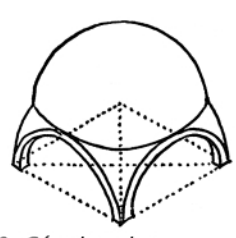

14. Bóveda estrellada


15. Bóveda reticulada


16. Cúpula cónica


17. Cúpula semiesférica


18. Cúpula con lados seccionados (bóveda vaída)


19. Cúpula sobre pechinas

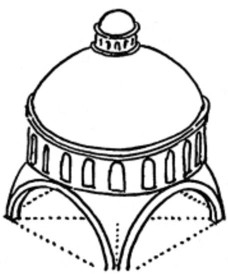
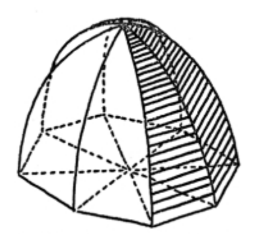

20. Ídem a 19 con tambor y linterna

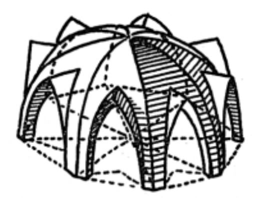
LÁMINA 2. TIPOS DE BÓVEDAS



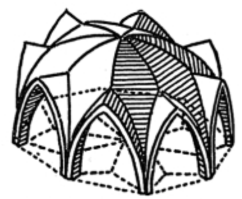
1. Bóveda en rincón de claustro apuntada sobre octógono regular



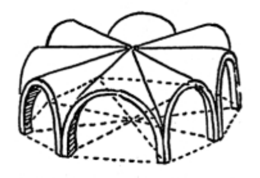
2. Bóveda en rincón de claustro con lunetos sobre un cuadrado



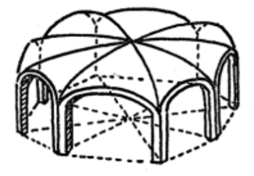
3. Bóveda en rincón de claustro con lunetos sobre un octógono regular



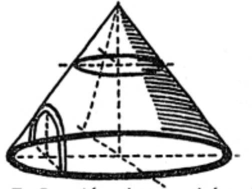
4. Bóveda en rincón de claustro truncada con lunetos sobre un octógono regular



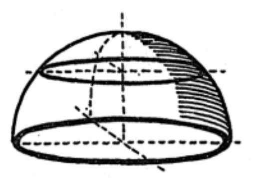
5. Bóveda de gajos sobre un octógono regular



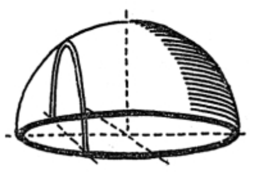
6. Cúpula gallonada rebajada



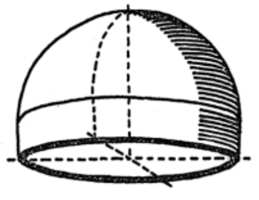
7. Sección de una bóveda cónica con un plano vertical y otro horizontal



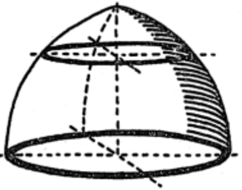
8. Sección de una cúpula esférica con un plano horizontal



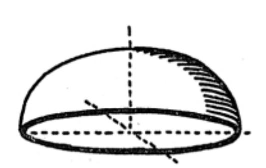
9. Sección de una cúpula esférica con un plano vertical



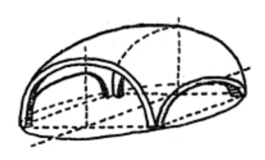
10. Sección de cúpula esférica con apoyo vertical (tambor)



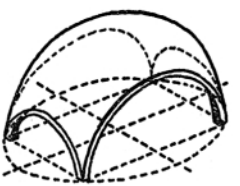
11. Cúpula apuntada



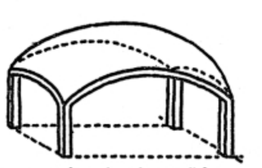
12. Cúpula elipsoidal. La planta es una elipse



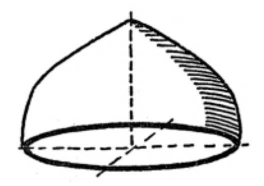
13. Secciones de un elipsoide con planos verticales (bóveda bohemia)



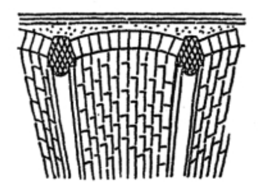
14. Bóveda vaída esférica sobre planta rectangular



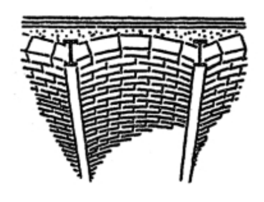
15. Bóveda de cañón con generatrices en arco de círculo (bóveda bohemia)



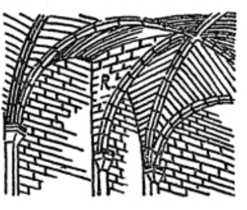
16. Combinación de una cúpula esférica y una cónica



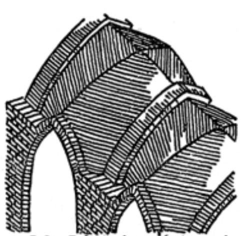
17. Bóveda rebajada (bovedilla) entre dos vigas de madera



18. Bóveda rebajada (bovedilla) entre dos vigas de acero



19. Bóveda normanda primitiva sexpartita por la colocación del nervio R



20. Bóveda gótica de trompeta (en rincón de claustro truncada)

1
Geometría

1.1 Construcciones geométricas de arcos y de la dirección de las juntas

En los manuales sobre geometría plana encontramos las construcciones de arcos más usuales. Las más sencillas son aquellas que constan de semicírculos o partes de círculos, combinados o no con líneas rectas. La dirección de las juntas va generalmente hacia los centros, aunque a veces son necesarias algunas pequeñas desviaciones en las transiciones entre las partes de los arcos compuestos. Algo más complicados son los arcos en los que la forma está definida por una elipse (o por un arco carpanel, como aproximación a la elipse), por una parábola, una catenaria o una hipérbola.

Como regla general, las juntas se disponen perpendiculares a la línea de intradós. A lo largo de los tiempos han surgido diferentes métodos para determinar las direcciones de las juntas de una manera fácil. Así, el profesor G. J. Morre, en su momento catedrático de la Escuela Politécnica de Delft, diseñó una plantilla para el trazado de las juntas de un arco elíptico. Las líneas que dividen el ángulo entre los radios vectores del arco, son las tangentes al borde superior de dicha plantilla. Si se deja deslizar una regla sobre ella, se obtienen las direcciones de las juntas (Lám. 4, fig.2).

Si junto a uno de los arcos arriba mencionados, se traza otro arco con todos los puntos a igual distancia del primer arco (con líneas rectas se hablaría de «en paralelo»), entonces la nueva figura es de diferente naturaleza que la primera. Si por ejemplo la primera figura era una elipse, entonces la segunda figura no lo es. Si el citado procedimiento se aplica a un arco apuntado, entonces el arco apuntado resultante no es de igual forma que el primero. Solamente el círculo es una excepción.

Los arcos se llaman rebajados si su altura o flecha es menor que la mitad de la luz y peraltados si es mayor que la mitad.

La base de los arcos puede ser horizontal, aunque también puede estar inclinada respecto al plano horizontal. En este último caso la construcción se hace algo más complicada y se tiene que tener buen cuidado de la disposición de la dirección de las juntas (Lám. 4, fig. 5).

Los arcos son realmente bóvedas, pero bóvedas de un espesor escaso. Tienen una aplicación múltiple, sobre todo para cubrir vanos en muros y entre columnas, aunque son también una parte importante de las bóvedas, en las que generalmente son indispensables.

1.2 Construcción geométrica de superficies y cuerpos

Las formas básicas de la mayoría de las bóvedas se pueden obtener de diferentes modos. Las principales se discuten a continuación.

Cilindros

Una línea recta, la generatriz, moviéndose paralela a sí misma, corta a una determinada curva (la curva directriz o perfil de la bóveda). La recta citada discurre paralela al eje de la bóveda.

En nuestras consideraciones la curva directriz yace sobre un plano, perpendicular a la línea que se mueve.

Si la línea generatriz discurre paralela al plano del suelo, la bóveda toma la forma de una bóveda de cañón. Si la generatriz forma un ángulo con el plano del suelo, toma la forma de una bóveda de cañón rampante (Lám. 1).

Si la flecha de una bóveda de cañón circular es pequeña, por ejemplo menor que el radio del semicírculo, entonces se habla de una bóveda rebajada. Esta for-

LÁMINA 3. FORMAS DE ARCOS

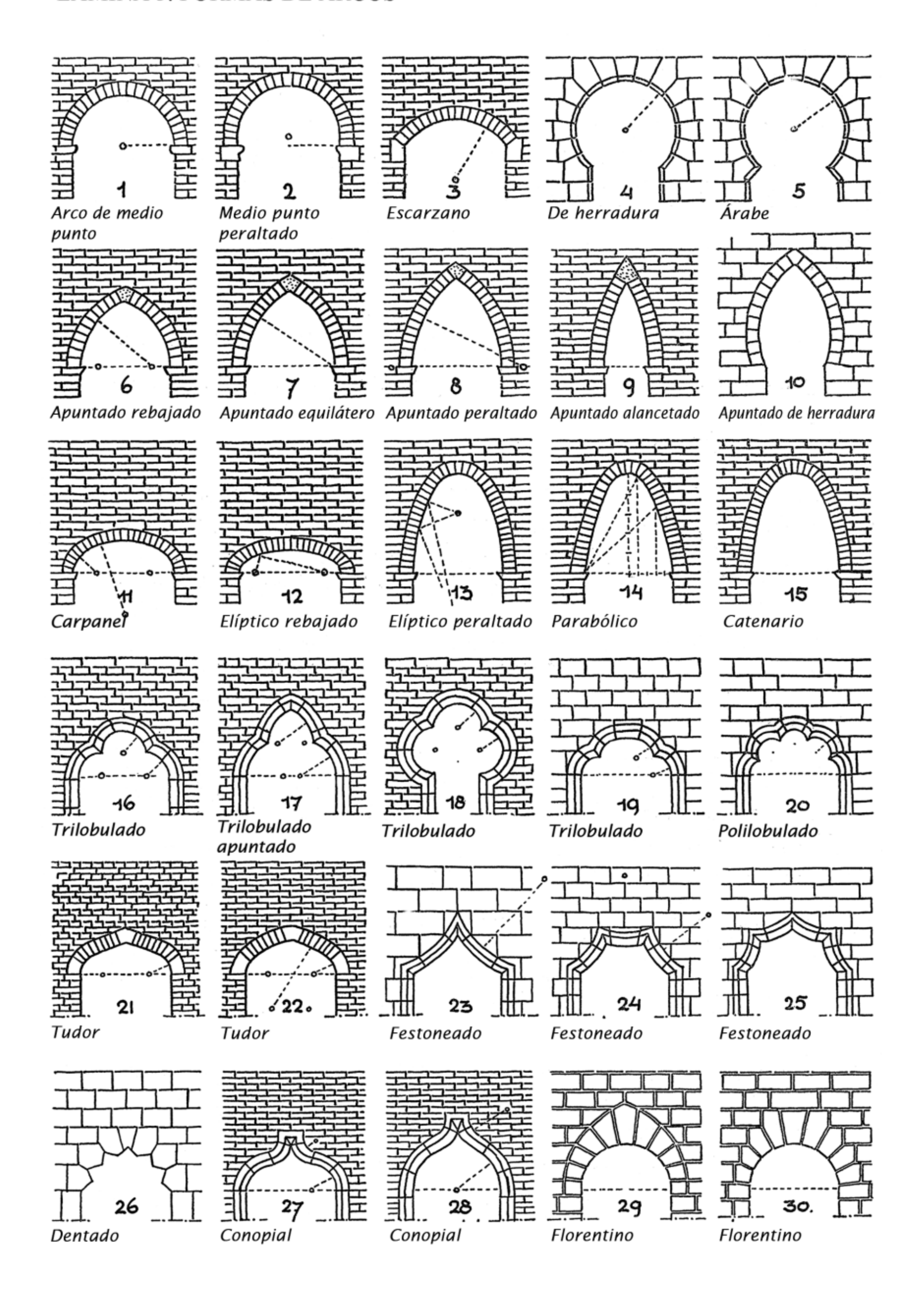
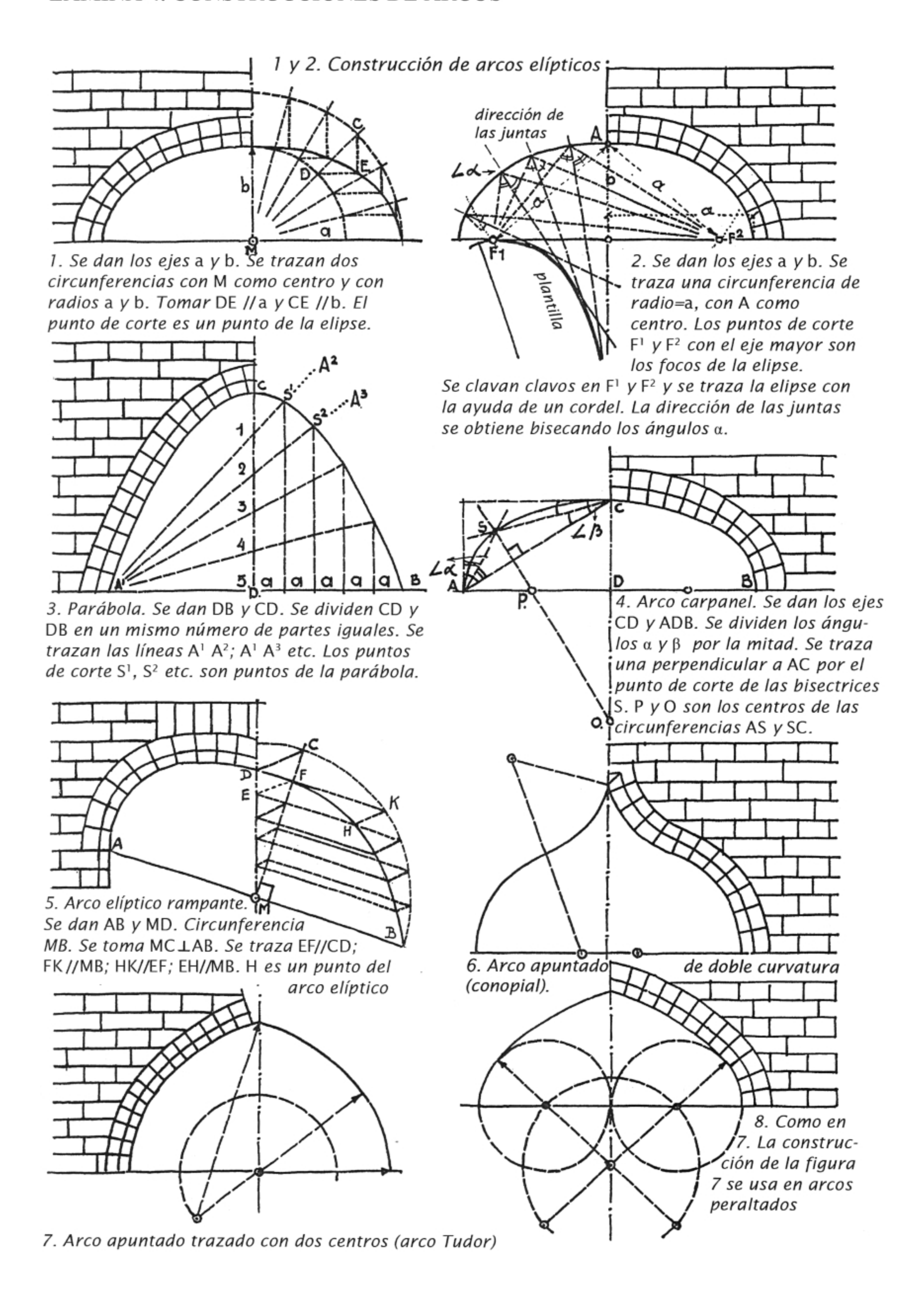


LÁMINA 4. CONSTRUCCIONES DE ARCOS



ma se emplea a menudo para hacer bovedillas. Las hiladas de una bovedilla pueden discurrir, bien paralelas, bien perpendiculares a la dirección del eje (Lám. 2, figs. 17, 18).

Superficies cónicas

Un sistema de líneas rectas cortan una línea curva determinada, sea circunferencia, elipse o figura compuesta (la curva directriz) y pasan por un punto fijo, el vértice (Lám. 1, fig.16).

De aquí surgen las formas básicas de las bóvedas cónicas. La curva directriz tendrá en general un centro. Si el vértice no está sobre su perpendicular, entonces surgen las bóvedas cónicas oblicuas. Utilizando planos de corte se pueden obtener las formas básicas de:

a) bóvedas en forma de trompa (Lám. 42, figs. 7, 9)
b) bóvedas en forma de cono truncado (Lám. 2, fig. 7)

En general se trata aquí de superficies cónicas de curva directriz una elipse o un círculo y en las que el vértice está en la perpendicular sobre el centro.

Superficies de revolución

Una línea curva arbitraria, la línea directriz, se hace girar en torno a un eje. Si la línea es una recta entonces surgen casos particulares de bóvedas cónicas tratadas antes, Figura 1.A. Si esta recta discurre además paralela al eje se obtienen entonces las bóvedas cilíndricas tratadas antes, Figura 1.B. Si es una línea curva, entonces se pueden producir muchos casos.

Consideramos primero el caso de que el eje sea vertical y que por la línea directriz y el eje se pueda hacer pasar un plano. La directriz puede ser:

a) un cuarto de círculo con uno de los radios extremos como eje, Figura 1.C. De aquí nace la cúpula semiesférica o media naranja (Lám. 2, figs. 8–10);
b) un arco de círculo menor de 90º, girado alrededor de uno de sus radios extremos, (Fig. 1.D), genera una cúpula rebajada (Lám. 2, fig. 11);
c) un arco de círculo mayor de 90º, girando alrededor de uno de sus radios extremos, Fig. 1.E, produce una cúpula con perfil de herradura (ver bóvedas persas);

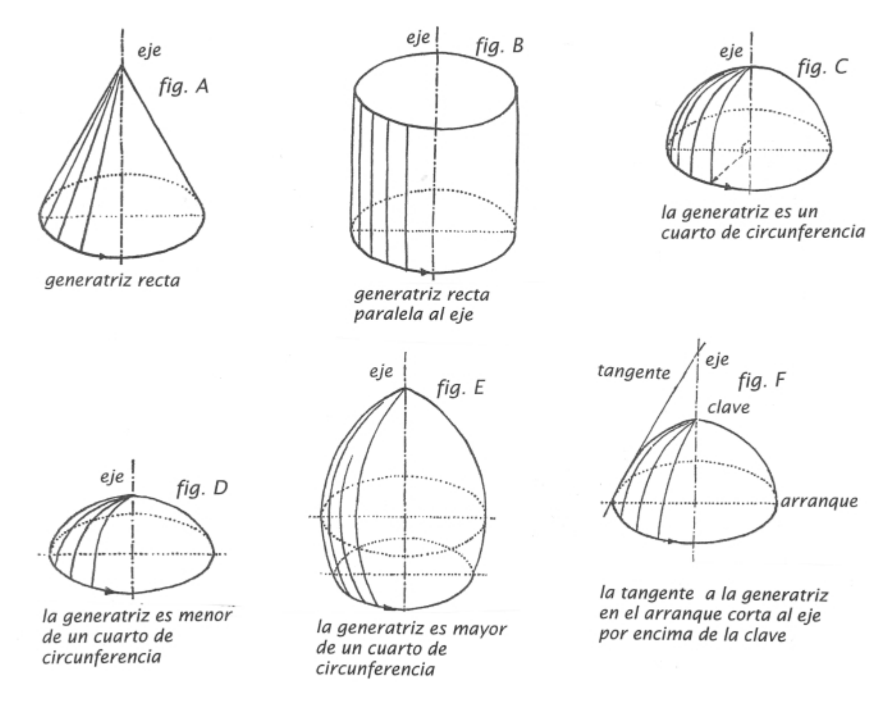


Figura 1. Superficies de revolución

d) un arco de círculo menor de 180º girado en torno a un eje que pasa por uno de sus extremos y corta al radio por el otro extremo. De aquí surgen tres clases de cúpulas (Lám. 2, fig. 11). Para diferenciarlas se traza una tangente a la directriz en el punto donde corta al suelo.

En primer lugar esta tangente puede cortar al eje por encima del vértice de la bóveda. Entonces se tiene una cúpula de arco apuntado rebajado (el arranque no es vertical), Figura 1.F.

En segundo lugar la tangente puede cortar el eje bajo el arranque de la bóveda, Figura 2.G. Surge entonces una cúpula de herradura apuntada (cúpula persa);

En tercer lugar la tangente es paralela al eje, Figs. 2.H, I, J. De ello puede surgir tanto una bóveda en forma de media naranja como de arco apuntado peraltado, dependiendo de la relación entre flecha y luz de la base; la consecuencia del giro puede ser también una bóveda de abanico. El arranque es naturalmente en estos casos vertical;

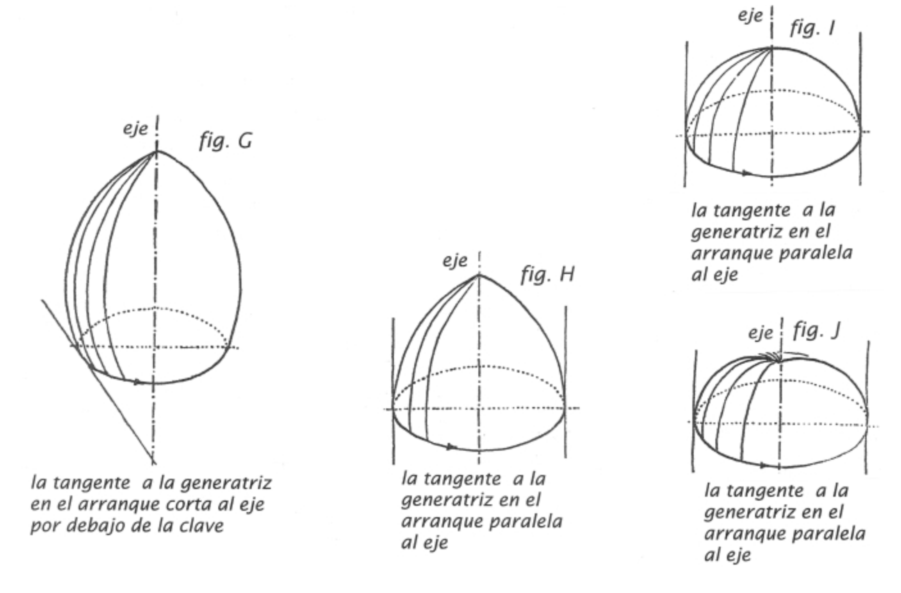


Figura 2. Superficies de revolución

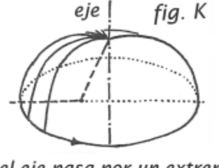
e) un arco de circunferencia girando alrededor de un eje, que pasa por uno de los extremos y corta a la prolongación del radio que pasa por el otro extremo, Figura 3.K. Con ello resulta también una cúpula invaginada o de palmera (Lám. 64, figs. 2, 3);

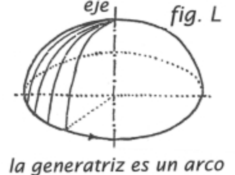
f) un arco de elipse girando sobre su eje menor. Con ello se forma una cúpula elíptica rebajada (elipsoide), Figura 3.L;

g) un arco de elipse girando sobre su eje mayor, Figura 3.M. Se forma una cúpula elíptica peraltada (elipsoide). Las plantas de esta cúpula y la anterior son círculos;

h) por analogía con los casos de arco de círculo en rotación tratados, también se pueden hacer girar partes de una elipse sobre un eje. Los casos excepcionales que de aquí pueden surgir tienen poco interés para la construcción práctica de bóvedas;

i) una parábola girando sobre su eje. Se genera una cúpula parabólica (paraboloide). Si el eje de giro no es el de la parábola se producen, de nuevo, diferentes formas abovedadas: la cúpula apuntada normal, rebajada y peraltada (Lám. 2. fig. 11);





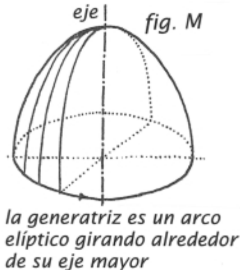


Figura 3. Superficies de revolución

j) figuras compuestas girando sobre un eje. El número de casos es naturalmente enorme. Aquí pueden surgir cúpulas de doble curvatura y formas cupuliformes de carácter decorativo, tal como muestra la construcción abovedada hindú (Láms. 48, 49)

Si se colocan planos verticales cortando las citadas cúpulas entonces se obtienen de nuevo numerosas formas abovedadas (Lám. 2, figs. 13, 14).

Colocando un plano vertical que pase por el eje surgen las semicúpulas o los nichos cupuliformes (Lám. 32, fig. 1, Lám. 122). Si se coloca el plano de corte fuera del eje se obtienen nichos más o menos profundos (Lám. 32, fig. 1).

Se pueden separar partes por medio de planos verticales, de manera que la planta se convierta en un polígono (Lám.1, fig. 18; Lám. 2, fig. 14). Surgen así las bóvedas vaídas. En general, se disponen cuatro planos verticales y perpendiculares dos a dos entre sí.

En una semiesfera los planos cortados tienen forma de semicírculo. Si estas bóvedas tienen escasa altura, se las denomina bóvedas bohemias.

Colocando dos planos verticales que se cortan entre sí y uno horizontal se separan triángulos esféricos. Éstos tienen una amplia aplicación en la pechinas (Lám. 1, fig. 19);

k) la mayoría de los tipos de arcos aquí tratados se pueden también hacer girar sobre un eje que esté totalmente fuera de ellos, que discurra paralelo al eje del arco. Con ello surgen las bóvedas de cañón anulares (con un semicírculo, un semitoro), (Lám. 1, fig. 5).

Si durante el giro (caso anterior) al perfil del arco se le hace subir uniformemente de manera que la directriz describe una hélice, surge entonces la bóveda de cañón ascendente, tórica, helicoidal o de caracol.

La planta de la hélice se puede pensar incluso elíptica, con lo que surge una bóveda de caracol elíptica (Renacimiento italiano).

En la consideración de los casos anteriores hemos supuesto que el eje de giro es perpendicular al suelo, esto es, vertical. Ahora tratamos el segundo caso, que el eje de giro discurra paralelo al suelo, que sea horizontal.

El único caso interesante es la cúpula obtenida por el giro de una elipse de la que surge un elipsoide. En contraste con los elipsoides citados en los párrafos f) y g), más arriba, en los que la planta era un círculo, aquí la planta es una elipse (Lám. 2, fig. 12).

Este elipsoide proporciona la forma para la verdadera bóveda bohemia, cuyo nombre se da también a bóvedas esféricas rebajadas y a las bóvedas de traslación del siguiente apartado. También se pueden aquí cortar partes de la bóveda. Las secciones perpendiculares al eje de giro son naturalmente círculos, las secciones por planos verticales paralelos al eje de giro, elipses.

Superficies de traslación

A lo largo de una curva, la curva directriz (parte de un círculo), situada en un plano vertical, se mueve otra curva. Esta curva generatriz puede ser arbitraria aunque la mayoría de las veces es un segmento de una circunferencia o de una elipse. El vértice de la curva móvil tiene que estar siempre sobre la curva directriz y su plano ser perpendicular al plano de la directriz. (La curva generatriz debe permanecer siempre en vertical.) De aquí surge una bóveda de cañón con curvatura en todas las direcciones. Se la podría llamar bóveda de cañón curvada doblemente o abombada, también llamado bóveda de Bohemia (Lám. 2, fig. 15). Esta bóveda ofrece muchas posibilidades al constructor de bóvedas.

Las secciones paralelas a la curva generatriz son siempre congruentes, así como las secciones paralelas a la directriz. Se puede partir también de la curva generatriz tomada como directriz, y a lo largo de ella desplazar la directriz original, con lo que se obtiene la misma superficie. Se obtiene también una superficie semejante haciendo girar una curva sobre un eje horizontal situado fuera de la

curva. La desventaja práctica es, sin embargo, que las secciones verticales no permanecen congruentes. (Esto es consecuencia directa del hecho de que las secciones radiales sí permanecen congruentes.)

Cuña de Wallis

Algunas bóvedas tienen una forma geométrica denominada «cuña de Wallis». Esta notable superficie reglada, así llamada según J. Wallis, un matemático inglés del siglo XVII, muestra mucha semejanza con un cono, con la diferencia de que las rectas que describen su superficie exterior *no se cortan en un punto*, sino en una línea recta.

La cuña se obtiene como sigue: piénsese en una circunferencia y una recta fuera del plano de la circunferencia que corte a su eje. Sitúense planos perpendiculares a dicha recta. Estos cortan a la circunferencia en dos puntos y a la recta en un punto. Después se unen los puntos de corte en la circunferencia con los puntos de corte en la recta con lo cual se obtiene una familia de líneas que describen la cuña. Desplazando paralelamente el plano de corte se puede determinar toda la cuña (Lám. 12, figs. 1, 2).

Las secciones perpendiculares al eje situadas más cerca o más lejos del plano de la citada circunferencia tienen forma de elipse.

La cuña de Wallis se usa con frecuencia para determinar el corte de piedras en aberturas redondeadas en bóvedas de cañón anulares, por ejemplo en lucernarios, puertas y ventanas, en depósitos de agua, o en un edificio con una esquina redonda en la que se coloque una ventana redonda o una entrada con la parte superior arqueada (Lám 13, fig. 4). Nótese que si se abren arcos múltiples situados unos encima de otros, tal y como a menudo ocurre en los huecos de ventanas, teniendo diferentes diámetros, se deben usar varias cuñas. Nos remitimos para un estudio más profundo al opúsculo de Jager (1919).

1.3 Intersecciones de planos y cuerpos

Intersección de dos semicilindros

En la intersección de dos semicilindros pueden ocurrir diferentes casos según la disposición de los arranques de las bóvedas. Los arranques pueden estar en un mismo plano (plano de la planta), pueden estar en dos planos paralelos, o bien pueden situarse en planos que se cortan entre sí. En todos los casos los ejes de los cilindros pueden cruzarse o cortarse en perpendicular o en oblicuo.

En general la intersección de dos cilindros arbitrarios da una curva que *no* se sitúa sobre un plano, esto es, una curva alabeada, cuyas proyecciones en planta son líneas curvas. Para obtener la forma de esta curva se tiene que construir punto por punto.

Solamente en casos muy especiales la intersección dará dos arcos diagonales que estén cada uno de ellos contenidos en un plano. En estos casos el perfil de uno de los cilindros se puede obtener por una proyección paralela del otro perfil (Lám. 5), es decir, cuando el perfil de uno de los cilindros (situado en un plano vertical) al proyectarse sobre otro plano vertical da el perfil del otro cilindro. En general se sigue de esto que el plano del arranque y la altura de clave de ambos cilindros tienen que ser iguales. (Se da por supuesto que los ejes de ambos cilindros son horizontales). Estos casos se producen entre otras situaciones por:

– la intersección de dos bóvedas de cañón cilíndricas de igual diámetro y altura de coronación;
– la intersección de dos bóvedas de cañón semielípticas con igual altura de coronación. Ambos planos de arranque son coincidentes. Como caso excepcional puede citarse cuando una de las bóvedas de cañón sea una semicircunferencia. Si lo son las dos, entonces estamos en el primer caso.
– la intersección de dos bóvedas de cañón parabólicas, cuando sus líneas de clave tienen la misma altura.

Si se tiene que determinar la intersección de dos bóvedas de cañón que no reúnen las condiciones anteriores, las proyecciones horizontales de las líneas de in-

tersección son líneas curvas. Puede hacerse que estas líneas sean rectas cambiando el perfil de una de las bóvedas de cañón.

Algunas propiedades de las bóvedas surgidas por la intersección de dos bóvedas de cañón

La intersección de dos bóvedas de cañón produce, bien una bóveda de arista, o una bóveda en rincón de claustro. En la Lám. 1, fig. 1 los paños de bóveda *a* son partes de la bóveda de arista y los *b* de la de rincón de claustro. Se podría decir que la bóveda de arista es el negativo fotográfico de la de rincón de claustro y viceversa. Lo que en una es material, en la otra es espacio. En los casos normales, los paños de una bóveda de arista ejercen empuje solamente sobre los cuatro puntos de las esquinas, mientras que los paños de una de rincón de claustro apoyan sobre todo el perímetro de la base.

No obstante, existe también la bóveda en rincón de claustro abierta o truncada en diagonal, que presenta más semejanza con la de arista. En ella las proyecciones en planta de las líneas de intersección son mediatrices de los lados. Los paños de las bóvedas apoyan ahora sobre arcos que descansan sobre los cuatro pilares de esquina (Lám. 1, fig. 10). (Hay también bóvedas de arista y en rincón de claustro de múltiples paños, Lám. 2, figs. 3, 4, 5, 6.)

Si se sitúan planos en un punto arbitrario perpendicular a los lados del plano de la base, éstos cortan a la superficie de la bóveda según líneas curvas aproximadamente como en la bóveda de arista. En la de arista, según líneas compuestas de un tramo recto, una parte curva y nuevamente otro tramo recto, mientras que estas líneas en la bóveda en rincón de claustro normal constan de una curva, una recta y de nuevo una curva. Si la sección se toma por la mitad entonces desaparece el tramo intermedio de la línea compuesta, que se convierte en un punto.

Estas dos clases de bóvedas tienen diferencias típicas: las líneas de clave en las de arista, obtenidas por intersección de dos bóvedas de cañón, son rectas, mientras que las líneas clave de las de rincón de claustro son curvas. Otra diferencia característica está en la forma de la arista, esto es, en el encuentro de los paños de la bóveda. Si miramos la bóveda desde abajo, en una de rincón de claustro el encuentro es *en profundidad* (arista entrante), en la de arista, por el

LÁMINA 5. INTERSECCIONES DE CUERPOS CILINDROS Y CÓNICOS

1. Intersección de dos semicilindros de distinto tamaño. La intersección proporciona en planta dos líneas curvas. En la figura se ha indicado la determinación de un punto de la intersección en proyección horizontal y vertical

2. Perspectiva

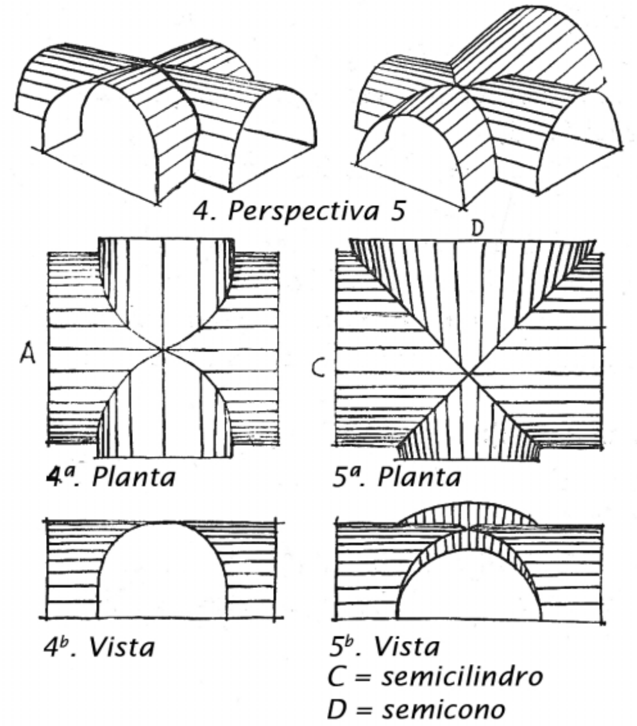
3. Perspectiva

2ª Planta

3ª Planta

2ᵇ. Intersección de dos semicilindros de igual sección. La proyección en planta consta de dos líneas rectas

3ᵇ. Intersección de un cilindro semicircular y otro elíptico con diferente ancho de base y la misma altura (líneas rectas en planta)



4. Perspectiva 5

4ª. Planta

5ª. Planta

4ᵇ. Vista

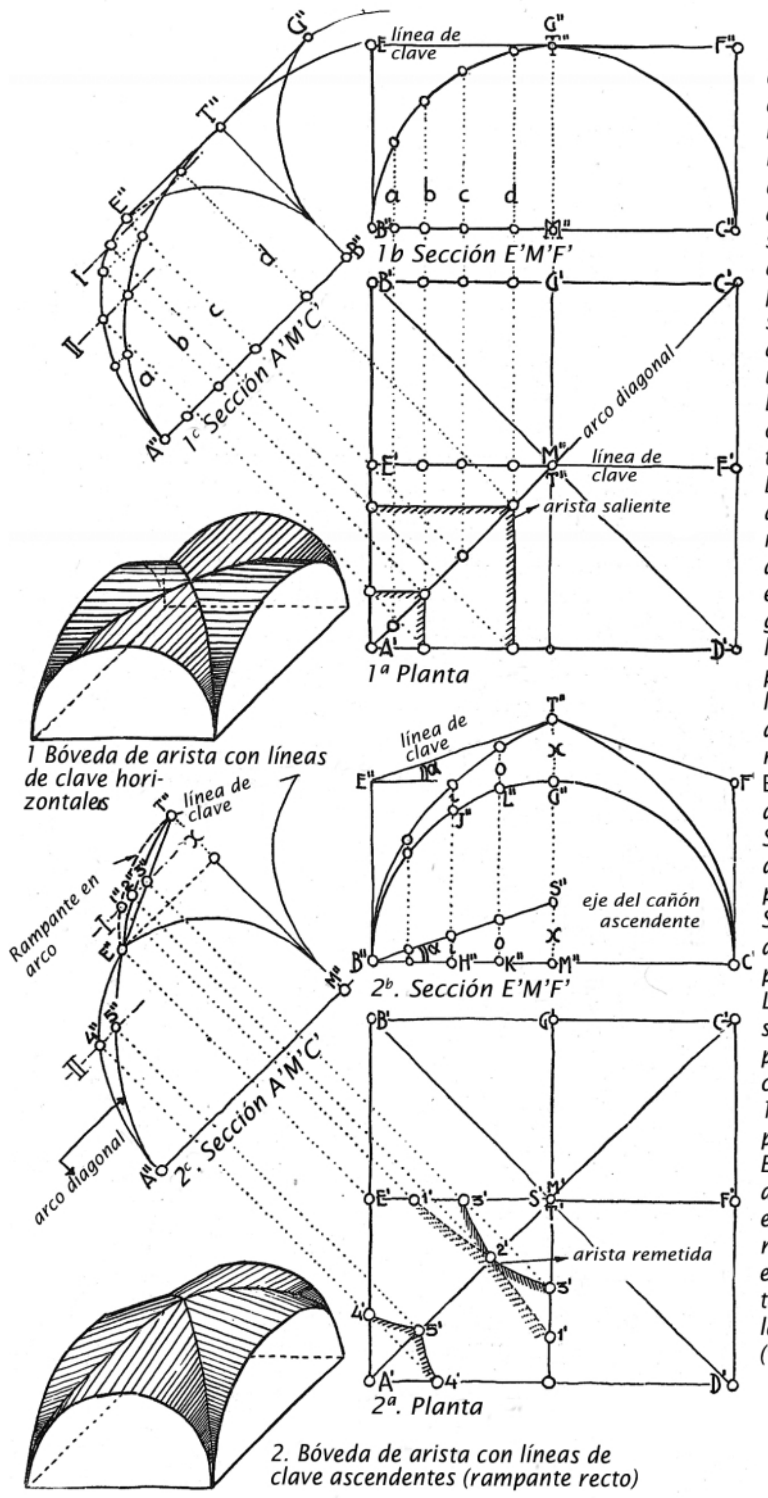
5ᵇ. Vista
C = semicilindro
D = semicono (truncado)

4. Intersección de dos cilindros semicirculares de diferente sección. Las líneas de clave se han dispuesto a la misma altura; la planta muestra líneas curvas.

5. Intersección de un cilindro semicircular con un cono; la planta da en este caso líneas rectas. Si la base del cono se coloca oblicua respecto a la del cilindro, o si la generatriz más alta del cono no toca a la superficie del cilindro, las proyecciones de la intersección en planta son líneas curvas. (1-5: Bóvedas de arista).

6. Intersección de dos cilindros semicirculares. (Bóveda en rincón de claustro).

LÁMINA 6. BÓVEDAS DE ARISTA SOBRE PLANTA CUADRADA CON LÍNEAS DE CLAVE ASCENDENTES Y CURVADAS

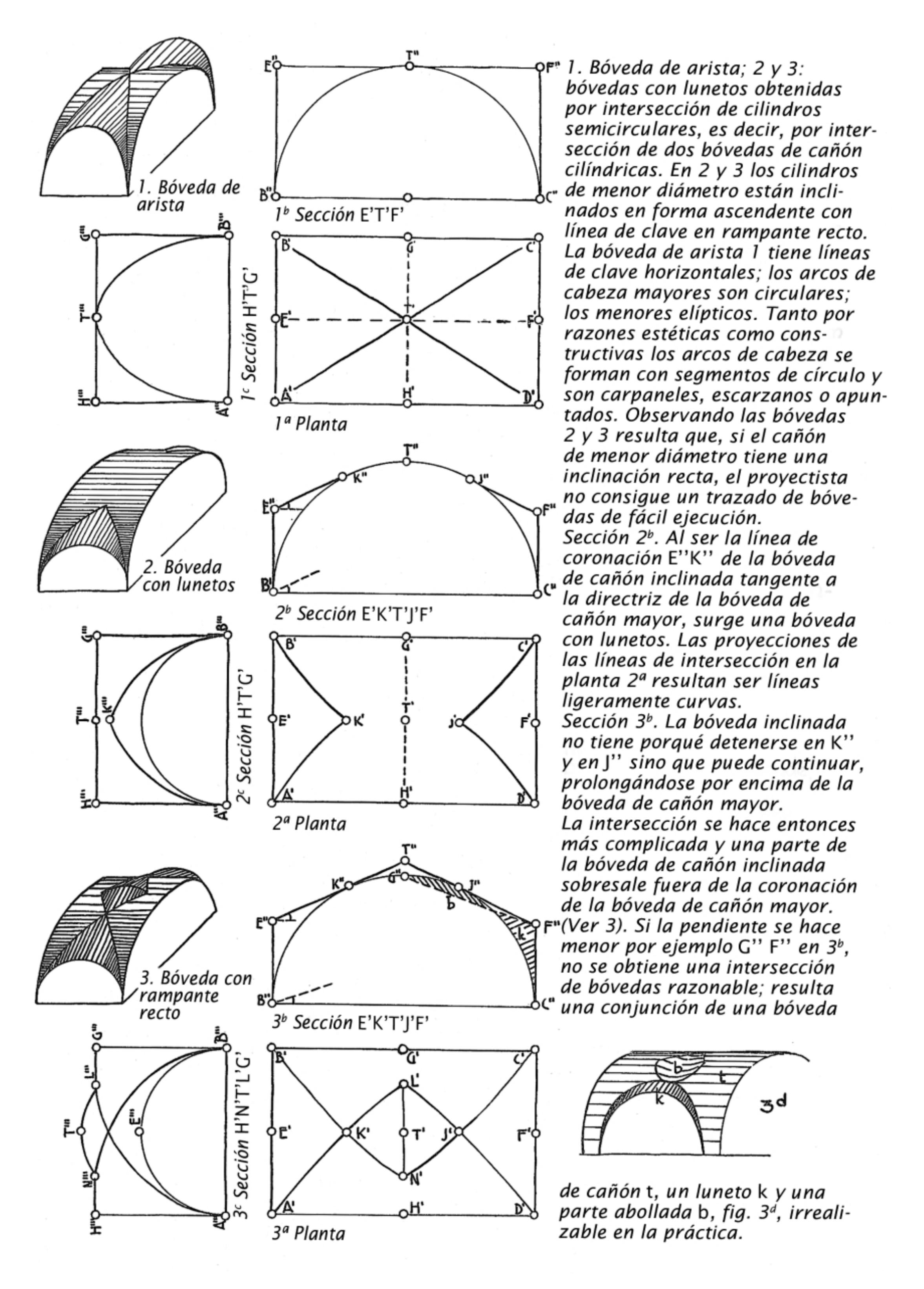


1 Bóveda de arista con líneas de clave horizontales

2. Bóveda de arista con líneas de clave ascendentes (rampante recto)

1 y 2: Bóvedas de arista obtenidas por la intersección de cañones semicirculares. Por razones constructivas a las bóvedas se las da líneas de clave ascendentes. La línea de clave está peraltada y su altura en la bóveda de arista 2 es igual a x. *El peralte puede realizarse según una recta o según un arco. En 2 se ha dispuesto un peralte o rampante recto. Las dos bóvedas de cañón que componen la bóveda son por tanto ascendentes o rampantes. Las directrices de estas bóvedas de cañón son idénticas a los respectivos arcos de cabeza, así por ejemplo,* B''G''C'' *y su eje* M''S'' *forman el mismo ángulo con el plano horizontal que la línea de clave (ver fig. 2^b). Las proyecciones verticales de los arcos de cabeza y los arcos diagonales se pueden determinar fácilmente. Sección 1^b:* B''T''C''G'' *= proyección del arco de cabeza y del diagonal. Sección 1^c:* A''E''B'' *= proyección del arco de cabeza;* A''T''C'' *= proyección del arco diagonal. Sección 2^b:* B''G''C'' *= proyección del arco de cabeza;* B''T''C'' *= proyección del arco diagonal. Los puntos del arco diagonal se obtienen prolongando las proyecciones* H''J'', K''L'', M''G'' *con* i, o, x, *etc. En las secciones 1^c y 2^c se han dispuesto unos planos horizontales I y II. En 1ª surgen exclusivamente aristas salientes. En 2ª la arista es saliente en* 4'5'4' *y está remetida en* 3'2'3'. *Esta última es una consecuencia del ramante recto. Curvando el rampante la arista remetida desaparece (ver punteado).*

LÁMINA 7. BÓVEDAS DE ARISTA SOBRE PLANTA RECTANGULAR



1. Bóveda de arista; 2 y 3: bóvedas con lunetos obtenidas por intersección de cilindros semicirculares, es decir, por intersección de dos bóvedas de cañón cilíndricas. En 2 y 3 los cilindros de menor diámetro están inclinados en forma ascendente con línea de clave en rampante recto. La bóveda de arista 1 tiene líneas de clave horizontales; los arcos de cabeza mayores son circulares; los menores elípticos. Tanto por razones estéticas como constructivas los arcos de cabeza se forman con segmentos de círculo y son carpaneles, escarzanos o apuntados. Observando las bóvedas 2 y 3 resulta que, si el cañón de menor diámetro tiene una inclinación recta, el proyectista no consigue un trazado de bóvedas de fácil ejecución.

Sección 2^b. Al ser la línea de coronación E''K'' *de la bóveda de cañón inclinada tangente a la directriz de la bóveda de cañón mayor, surge una bóveda con lunetos. Las proyecciones de las líneas de intersección en la planta 2^a resultan ser líneas ligeramente curvas.*

Sección 3^b. La bóveda inclinada no tiene porqué detenerse en K'' *y en* J'' *sino que puede continuar, prolongándose por encima de la bóveda de cañón mayor.*

La intersección se hace entonces más complicada y una parte de la bóveda de cañón inclinada sobresale fuera de la coronación de la bóveda de cañón mayor. (Ver 3). Si la pendiente se hace menor por ejemplo G'' F'' *en 3^b, no se obtiene una intersección de bóvedas razonable; resulta una conjunción de una bóveda de cañón* t*, un luneto* k *y una parte abollada* b*, fig. 3^d, irrealizable en la práctica.*

contrario, es *en elevación*, y la arista se proyecta hacia fuera (arista saliente). Esta arista saliente puede presentarse con más o menos claridad. En una bóveda de arista con arcos de cabeza semicirculares la arista se ve con toda claridad en la parte más baja de la bóveda, pero hacia el vértice sobresale menos y desaparece casi por completo hacia la clave (Lám. 52).

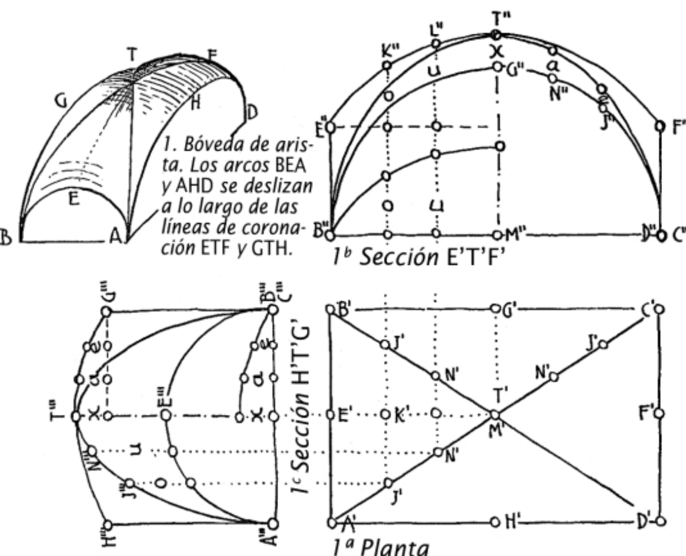
Para determinar si se obtiene una arista entrante o saliente se puede aplicar la siguiente regla: se coloca un plano paralelo al suelo, después se determinan las distancias entre todos los puntos de la intersección de la bóveda y este plano hasta el eje de la bóveda. Si estas distancias son mayores que las de las líneas de intersección de los arcos o aristas diagonales entonces se obtiene una arista saliente; si las citadas distancias son menores entonces surge una arista hacia la parte exterior de la bóveda, esto es, una arista entrante.

No obstante, esta regla no es de mucha ayuda ya que las superficies de las bóvedas la mayoría de las veces se desvían de la forma teórica. En bóvedas de arista con arcos de cabeza elípticos puede ocurrir que las aristas cerca de la coronación, debido a una ejecución imprecisa y asientos, se conviertan en entrantes como las de rincón de claustro.

También pueden surgir aristas entrantes si las líneas de clave de las bóvedas se realizan oblicuas, con pendiente hacia arriba. Se le da entonces a la bóveda un cierto apuntamiento que sirve para eliminar el asentamiento de la bóveda tras la ejecución, o para hacer la bóveda algo más fuerte o más esbelta (Lám. 6, fig. 2). En bóvedas rectangulares, mediante la formación de uno de tales apuntamientos se procederá naturalmente a la elevación de una de las líneas de clave. Haciendo las líneas de clave curvas puede evitarse la aparición de aristas entrantes (Lám. 6, fig. 2; Lám. 7; Lám.8), pudiéndose trazar fácilmente una bóveda manteniendo los arcos de cabeza semicirculares.

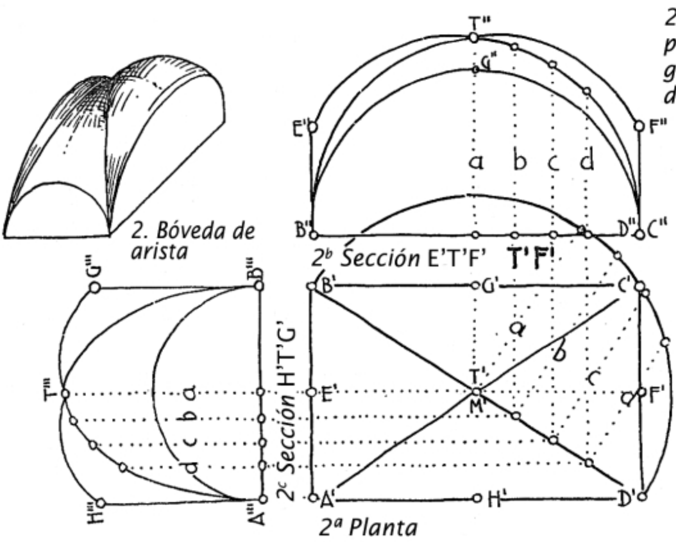
En la construcción medieval de bóvedas, la bóveda de arista con nervios o bóveda de crucería, experimentó un importante desarrollo; más adelante se estudiarán en detalle este tipo de bóvedas medievales.

LÁMINA 8. BÓVEDAS DE ARISTA SOBRE PLANTA RECTANGULAR CON LÍNEAS DE CLAVE ASCENDENTES Y CURVADAS



1. Bóveda de arista. Los arcos BEA y AHD se deslizan a lo largo de las líneas de coronación ETF y GTH.

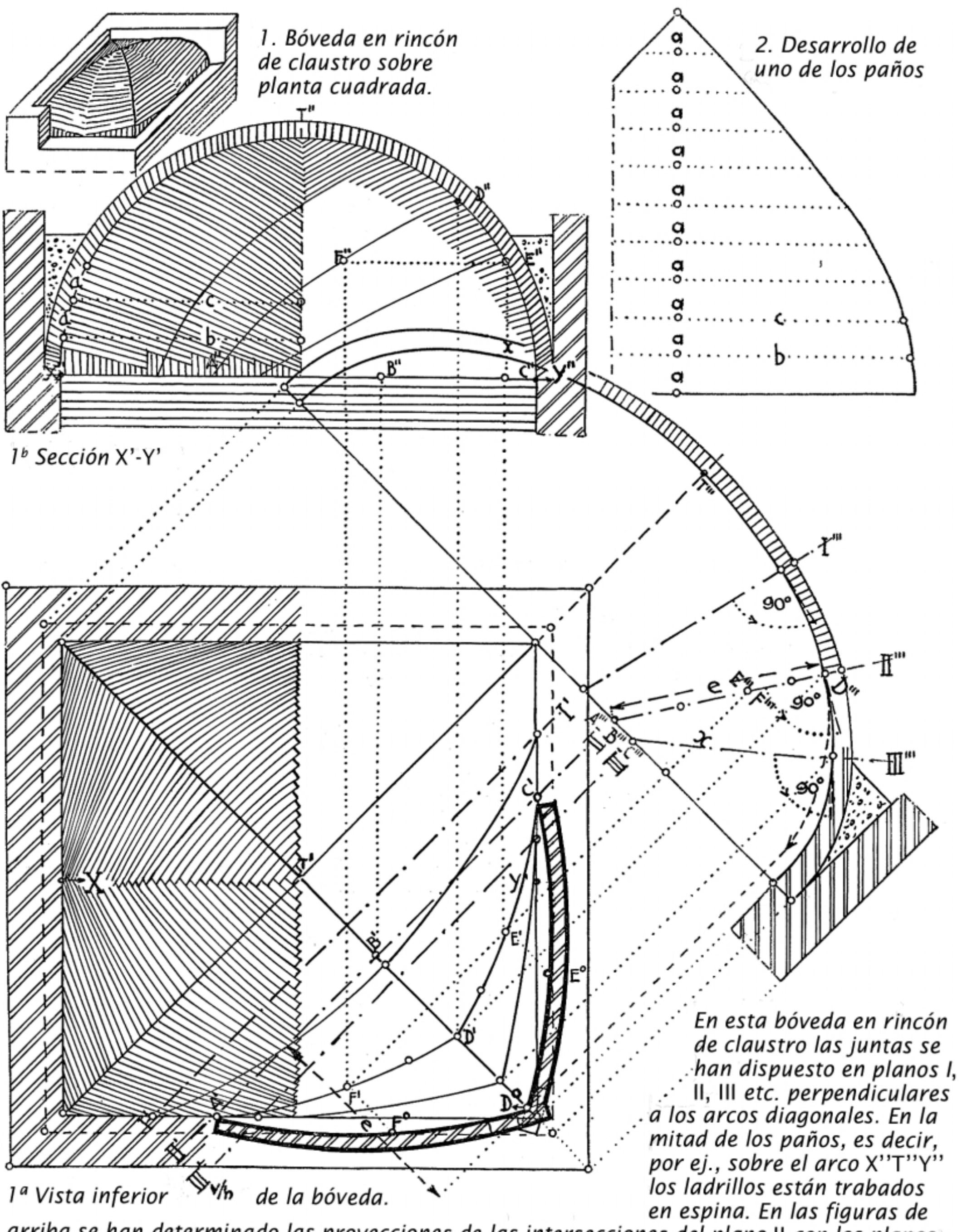
1. Bóveda de arista con lineas de clave o rampantes curvos. Se dan: a) las proyecciones del arco diagonal A'C' *y* B'D' *que son rectas; b) arcos de cabeza semicirculares* B''G''C'' *y* A'''E'''B''' *(figs. 1^b y 1^c), que además son las directrices de los paños de las bóvedas que forman la intersección; y c) la línea de clave arqueada* H'''T'''G'''*. La forma de las proyecciones de los arcos diagonales* B''T''C'' *y* A'''T'''B''' *así como la de la línea de clave* E''T''F'' *se puede deducir de estos datos. Se determina primero la proyección del arco diagonal* B''T''D'' *alargando los segmentos* x, a, e, *etc. iguales a la altura de la sobreelevación, por encima de los puntos correspondientes* G''N''J'' *etc. del arco de cabeza (figs. 1^c, 1^b mitad derecha). Después se determina la proyección del arco diagonal* A'''T'''C''' *mediante los puntos* J''' *y* H''' *etc. (fig. 1^c, mitad izquierda). Queda aún la determinación de la línea de clave* E''T''F'' *para lo cual se hace la operación inversa a la recién indicada. Se trazan los segmentos* o, u, *etc. (fig. 1^c izda) situados sobre la línea* B''M''C'' *(en fig. 1^b, izquierda) en las posiciones correspondientes y se prolongan con la altura del arco de cabeza* A'''E'''B'''*. Los puntos* K'', L'' *y* T'' *de la línea de clave quedan determinados de esta forma. Como las líneas de clave son arcos de circunferencia se pueden obtener directamente (cirfunferencia que pasa por tres puntos). De lo anterior resulta que hay una íntima relación entre los diferentes elementos. Si la forma de los paños de la bóveda no se ajusta a una determinada condición (en este caso, los arcos de cabeza son directrices de los paños) se pueden adoptar para estos paños superficies curvas que no se sujeten a una condición matemática. Éstos simplemente cubren el vano entre los arcos de cabeza y los diagonales. Se tiene además libertad para, manteniendo los arcos de cabeza semicirculares, hacer también semicirculares los arcos diagonales, con lo que sus proyecciones verticales son líneas rectas. Pero también se es libre de dar otra forma a los mencionados arcos.*



2. Bóveda de arista

2. Bóveda de arista. Aquí se ha partido de arcos de cabeza y diagonales semicirculares. Los paños de bóveda han sido tendidos de forma libre entre ellos. Para la coronación se pude adoptar por tanto una línea curva. Pero también se pueden tomar los cuatro paños de la bóveda como partes de superficies esféricas trazada con diferentes centros. Los arcos de cabeza y diagonales están en dichas superficies. Si todos los paños yacieran en la misma superficie esférica, que pasaría por los puntos de las esquinas, entonces desaparecerían los arcos diagonales y se tendría una bóveda vaída.

LÁMINA 9. BÓVEDA EN RINCÓN DE CLAUSTRO SOBRE PLANTA CUADRADA



1. Bóveda en rincón de claustro sobre planta cuadrada.

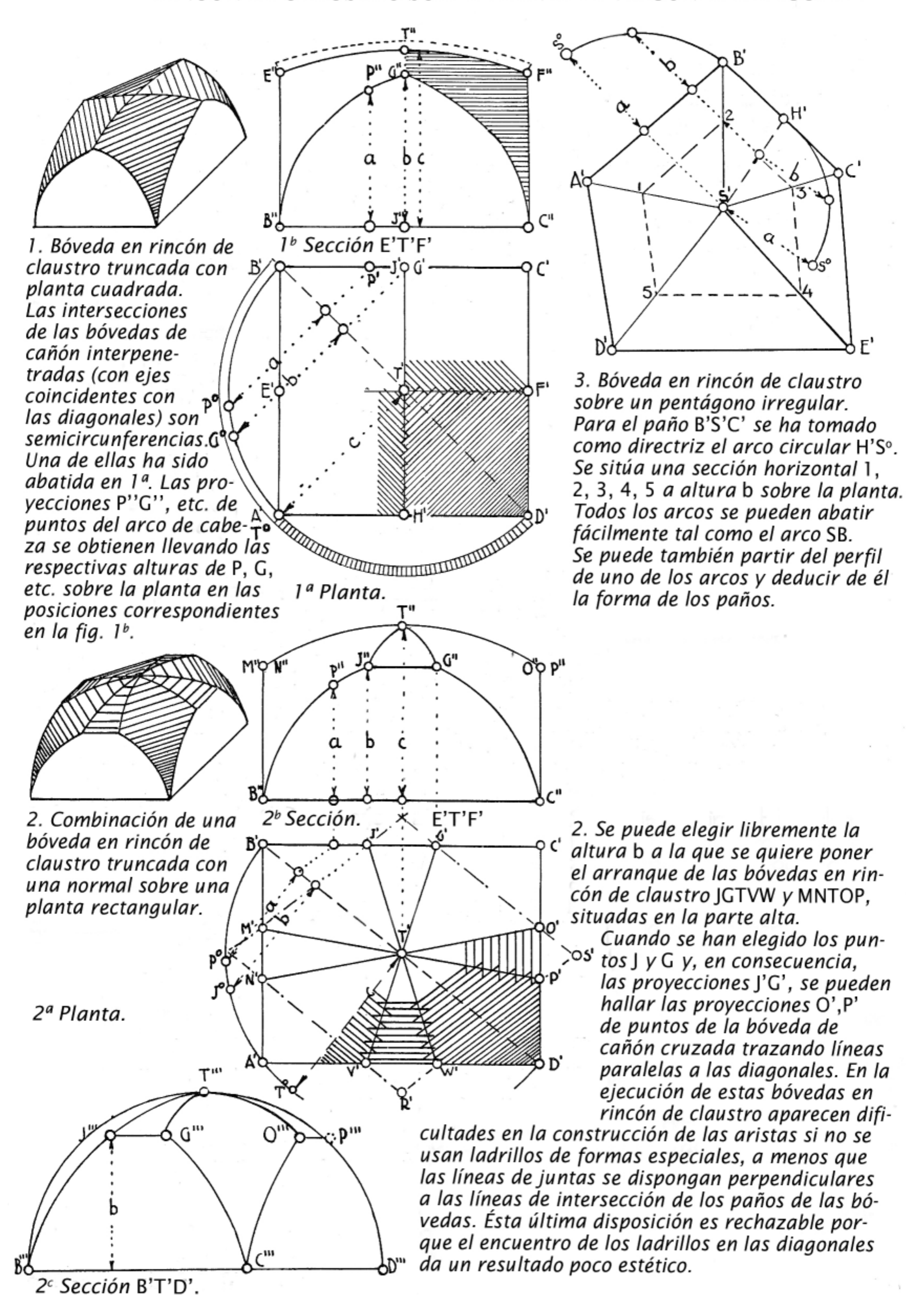
2. Desarrollo de uno de los paños

1ᵇ Sección X'-Y'

1ª Vista inferior de la bóveda.

En esta bóveda en rincón de claustro las juntas se han dispuesto en planos I, II, III *etc. perpendiculares a los arcos diagonales. En la mitad de los paños, es decir, por ej., sobre el arco* X''T''Y'' *los ladrillos están trabados en espina. En las figuras de arriba se han determinado las proyecciones de las intersecciones del plano* II *con los planos de proyección horizontal y vertical. Se dan las direcciones de juntas en los diferentes planos de proyección. Las proyecciones de un punto* E *de esta intersección se determinan como sigue: partimos de la proyección* E'''. *La proyección vertical está sobre la circunferencia de contorno* X''T''Y'' *a una altura* x *sobre* X''Y''. *La proyección horizontal* E' *puede deducirse de estos datos.* F' *y* E' *están en posición simétrica respecto de la diagonal; con ello se puede determinar* F' *y después* F''. *La verdadera magnitud de la intersección de* II *con la bóveda se obtiene abatiendo éste hacia abajo, con lo que* B'D°=B'''D'''=e. *En el arranque de la bóveda se han colocado los ladrillos a sardinel.*

LÁMINA 10. BÓVEDA EN RINCÓN DE CLAUSTRO TRUNCADA. BÓVEDA EN RINCÓN DE CLAUSTRO SOBRE PLANTA PENTAGONAL IRREGULAR



1. Bóveda en rincón de claustro truncada con planta cuadrada. Las intersecciones de las bóvedas de cañón interpenetradas (con ejes coincidentes con las diagonales) son semicircunferencias. Una de ellas ha sido abatida en 1ª. Las proyecciones P''G'', *etc. de puntos del arco de cabeza se obtienen llevando las respectivas alturas de* P, G, *etc. sobre la planta en las posiciones correspondientes en la fig. 1ᵇ.*

1ᵇ Sección E'T'F'

1ª Planta.

3. Bóveda en rincón de claustro sobre un pentágono irregular. Para el paño B'S'C' *se ha tomado como directriz el arco circular* H'S°. *Se sitúa una sección horizontal* 1, 2, 3, 4, 5 *a altura* b *sobre la planta. Todos los arcos se pueden abatir fácilmente tal como el arco* SB. *Se puede también partir del perfil de uno de los arcos y deducir de él la forma de los paños.*

2. Combinación de una bóveda en rincón de claustro truncada con una normal sobre una planta rectangular.

2ᵇ Sección.

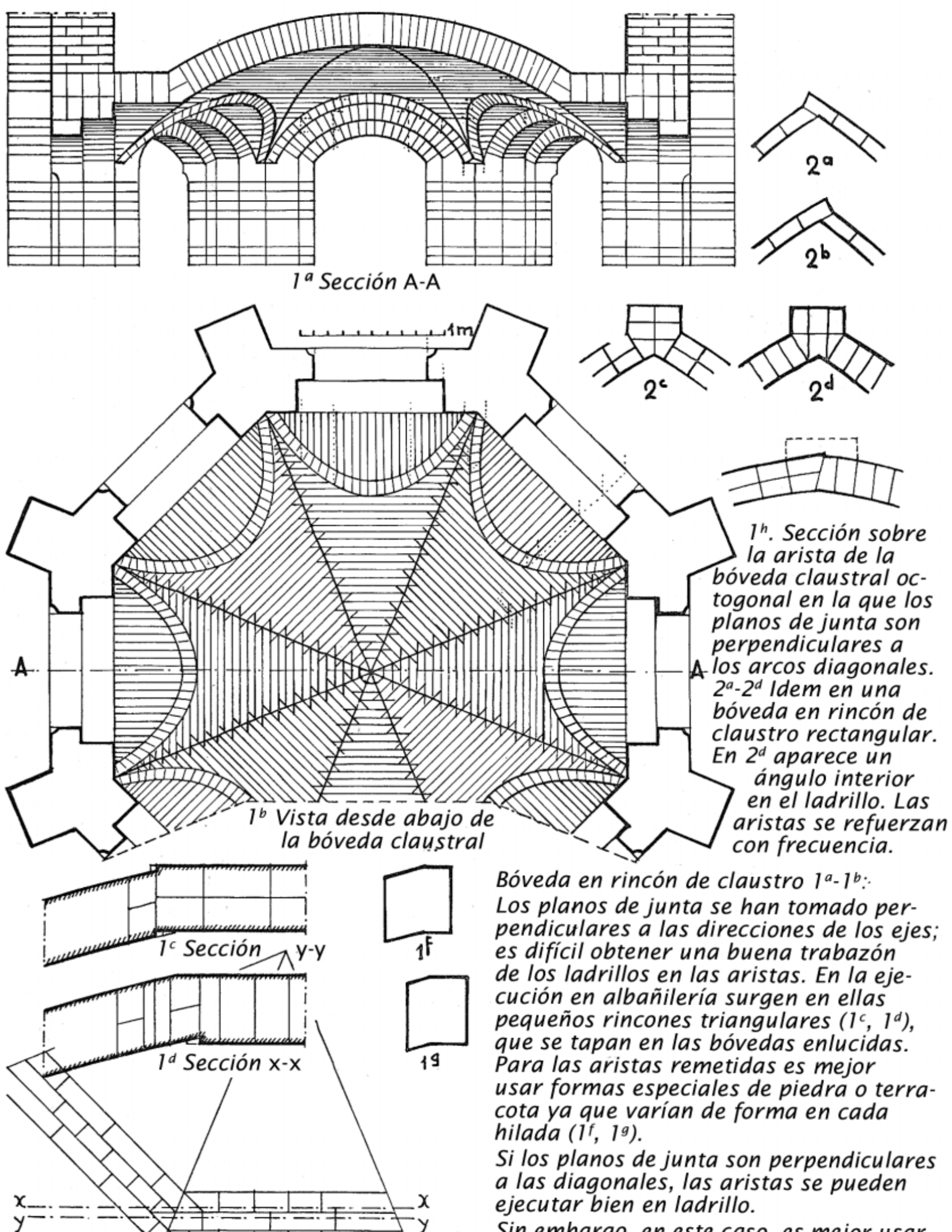
2ª Planta.

2ᶜ Sección B'T'D'.

2. Se puede elegir libremente la altura b *a la que se quiere poner el arranque de las bóvedas en rincón de claustro* JGTVW *y* MNTOP, *situadas en la parte alta. Cuando se han elegido los puntos* J *y* G *y, en consecuencia, las proyecciones* J'G', *se pueden hallar las proyecciones* O',P' *de puntos de la bóveda de cañón cruzada trazando líneas paralelas a las diagonales. En la ejecución de estas bóvedas en rincón de claustro aparecen dificultades en la construcción de las aristas si no se usan ladrillos de formas especiales, a menos que las líneas de juntas se dispongan perpendiculares a las líneas de intersección de los paños de las bóvedas. Ésta última disposición es rechazable porque el encuentro de los ladrillos en las diagonales da un resultado poco estético.*

LÁMINA 11. BÓVEDA EN RINCÓN DE CLAUSTRO CON LUNETOS SOBRE UNA PLANTA OCTOGONAL REGULAR

1. Bóveda en rincón de claustro con lunetos sobre planta octogonal regular según proyecto de J.P.Mieras y L.Zwiers.



1e Detalle de la vista inferior de la bóveda en rincón de claustro con secciones sobre la arista remetida.

Sección de un semicilindro con un plano.

Al cortar un semicilindro con un plano, si el plano es perpendicular al eje de la bóveda entonces el perfil de la sección es una semicircunferencia, una semielipse o una parábola. Si el plano es oblicuo respecto al eje la sección es una elipse, una parábola, etc. Con frecuencia, una bóveda termina en uno o ambos lados por un plano oblicuo. (Ver en el Cap. 2, el apartado «Bóvedas esviadas».) Para la construcción de este tipo de bóvedas es obligatorio determinar la forma precisa de las piedras y el sentido de las juntas, para lo que, entre otras cosas, la superficie de la bóveda se debe desarrollar sobre un plano (Lám. 12, fig. 5; Lám. 17).

1.4 Intersecciones de superficies de revolución con planos y otras superficies

En este apartado se estudian las intersecciones de superficies de revolución, tales como cilindro, semiesfera, semiesfera rebajada o peraltada, elipsoide, paraboloide, toro, con un plano, con un semicilindro, una superficie cilíndrica u otra superficie de revolución, y con una cuña de Wallis.

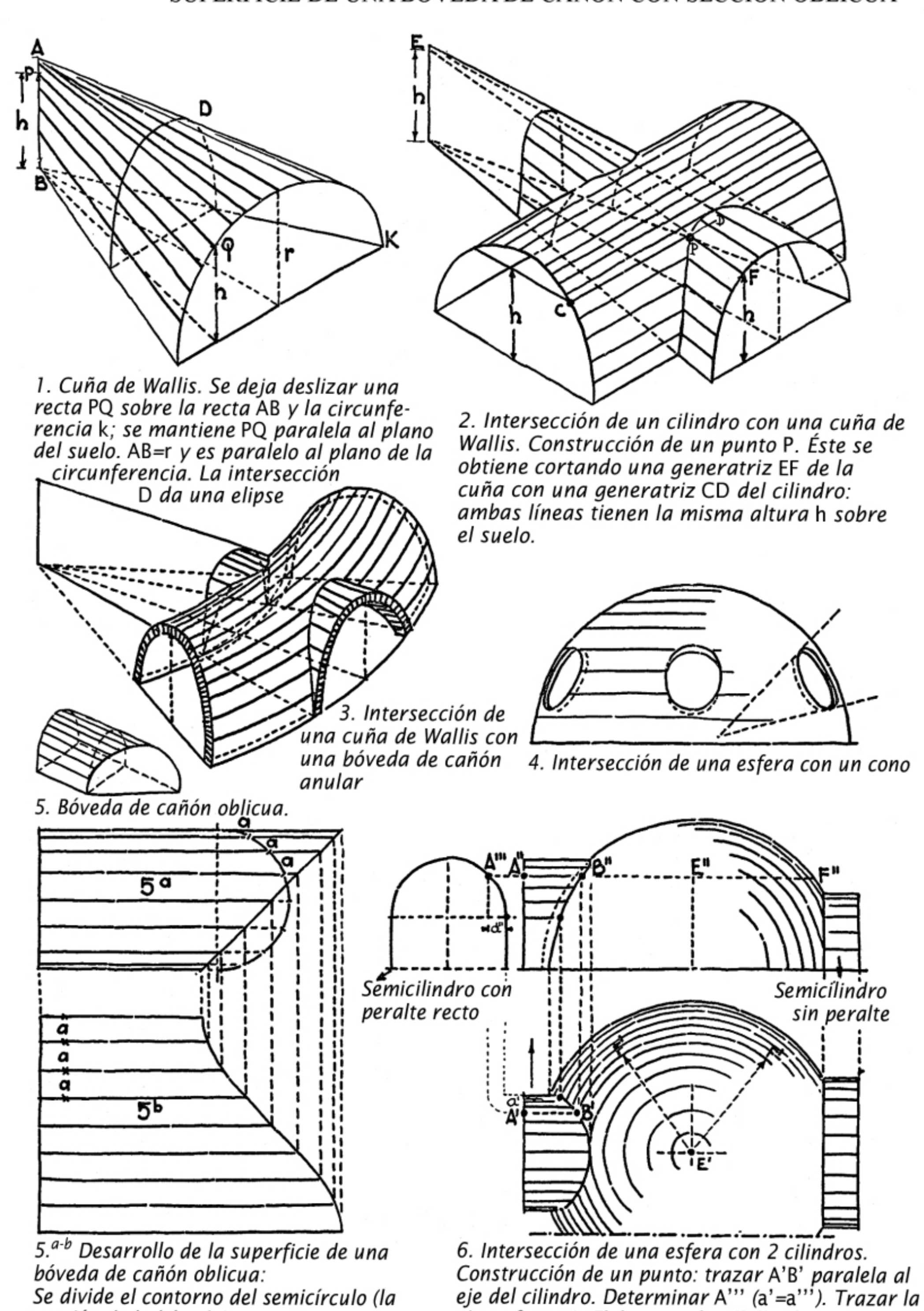
Si la intersección es con un plano, su determinación es la más sencilla. Para su construcción nos remitimos a los libros de texto de geometría descriptiva.

En intersecciones con superficies de revolución y con la cuña de Wallis, las aplicaciones son innumerables. A veces las bóvedas estás compuestas de diferentes cuerpos colocados unos junto a otros lo que ocurre cuando se disponen en ellas huecos de ventanas o nichos. Las intersecciones de éstos con la bóveda principal pueden remitirse a alguna de las figuras ya citadas.

En general estas intersecciones se pueden obtener de forma sencilla. Se eligen planos que corten a las superficies de revolución consideradas según líneas fáciles de construir tales como rectas o circunferencias.

Las líneas de ambas superficies, que estarán en un mismo plano, se cortan entre sí; los puntos de corte proporcionan los puntos de la intersección de las superficies de revolución. Tomando un suficiente número de planos de corte, encontraremos también un número suficiente de puntos de la intersección. Así, una esfera se corta según circunferencias (Lám. 12, fig. 6), un cilindro según líneas rectas paralelas al eje (Lám. 5, fig. 1), un cono según líneas generatri-

LÁMINA 12. LA CUÑA DE WALLIS. INTERSECCIÓN DE UN CUERPO ESFÉRICO CON CUERPOS CÓNICOS Y CILÍNDRICOS. EL DESARROLLO DE LA SUPERFICIE DE UNA BÓVEDA DE CAÑÓN CON SECCIÓN OBLICUA



1. Cuña de Wallis. Se deja deslizar una recta PQ *sobre la recta* AB *y la circunferencia* k*; se mantiene* PQ *paralela al plano del suelo.* AB=r *y es paralelo al plano de la circunferencia. La intersección* D *da una elipse*

2. Intersección de un cilindro con una cuña de Wallis. Construcción de un punto P*. Éste se obtiene cortando una generatriz* EF *de la cuña con una generatriz* CD *del cilindro: ambas líneas tienen la misma altura* h *sobre el suelo.*

3. Intersección de una cuña de Wallis con una bóveda de cañón anular

4. Intersección de una esfera con un cono

5. Bóveda de cañón oblicua.

5.a-b Desarrollo de la superficie de una bóveda de cañón oblicua:
Se divide el contorno del semicírculo (la sección de la bóveda) en partes.
Colocar estas partes según la fig. 5b.

6. Intersección de una esfera con 2 cilindros. Construcción de un punto: trazar A'B' *paralela al eje del cilindro. Determinar* A''' (a'=a''')*. Trazar la circunferencia* E'F' *con radio* E''F''*. El punto de corte* B' *de* A'B' *con la circunferencia es la proyección horizontal del punto buscado.*

ces (Lám. 20, fig. 5), y una cuña de Wallis también según líneas generatrices (Lám. 12, fig. 1).

El corte de la piedra

Para la determinación de la forma de las piedras, sobre todo de sus secciones y de sus planos de junta, es necesario, además de un buen conocimiento de la geometría descriptiva, una buena comprensión de la técnica del trabajo de la piedra. A partir de la planta y la vista, que son realmente la primera y segunda proyecciones de la figura considerada, se puede determinar la tercera proyección. Sin embargo, la mayoría de las veces esto no es suficiente para la ejecución y se hará también una proyección oblicua de la pieza. Los planos de junta se abaten normalmente sobre el plano horizontal, con lo que se da a conocer su verdadera magnitud. La mayoría de las veces hay cierta libertad en la elección de la dirección en que se trazan las juntas; aquí es el entendimiento del constructor el que debe marcar el camino adecuado a seguir (Láms. 13, 14, 20, 21).

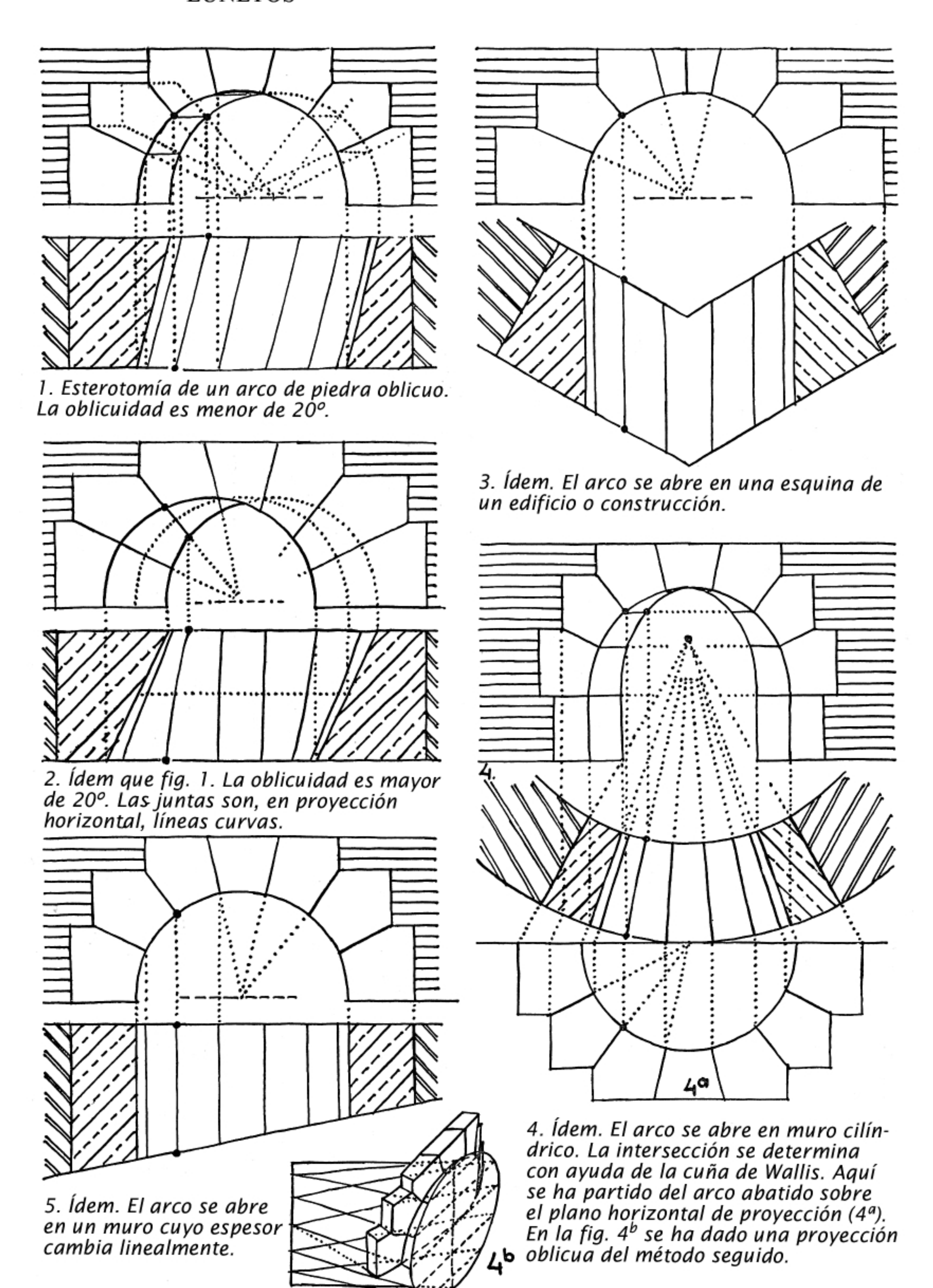
En ocasiones, es preciso calcular la intersección de una bóveda con un plano alabeado. Se entiende por «plano alabeado» un plano reglado obtenido por dos curvas o dos rectas que se cruzan cortadas por un sistema de rectas paralelas a un plano. (Las curvas no están sobre una superficie cilíndrica.)

La intersección se puede determinar buscando los puntos de corte de un número suficiente del citado sistema de rectas con el cuerpo a seccionar.

1.5 Aplicación de la estática a la construcción abovedada

La aplicación de la estática nos permitirá calcular la dirección y magnitud de las fuerzas internas principales que se producen en las bóvedas por la acción del peso propio y las sobrecargas. En el último capítulo sobre la estabilidad de las bóvedas se profundizará sobre ello; además se tratarán los principios en que se basa el método de cálculo.

LÁMINA 13. TRAZADO Y ESTEREOTOMÍA DE CONSTRUCCIONES EN ARCO. LUNETOS



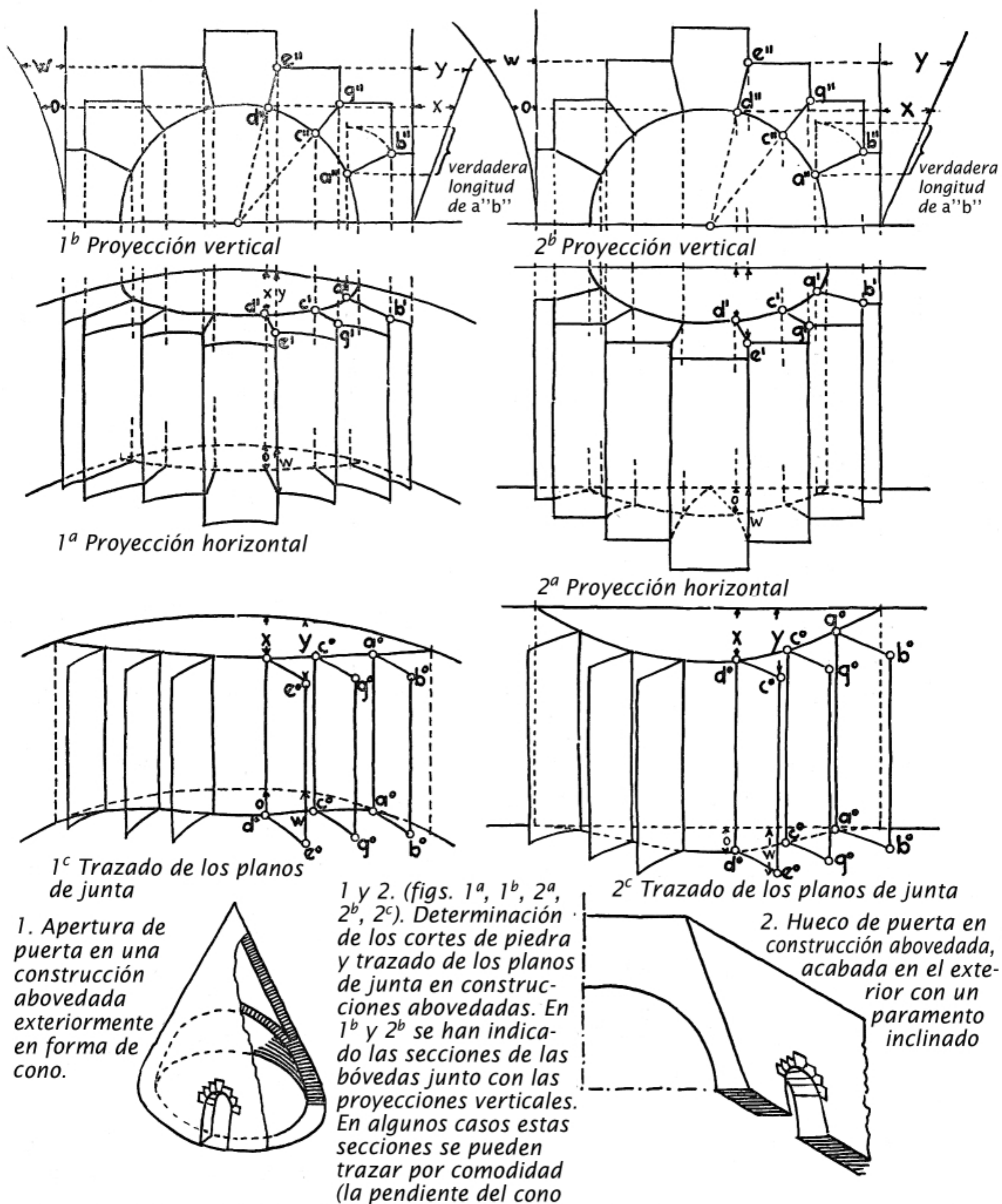
1. Esterotomía de un arco de piedra oblicuo. La oblicuidad es menor de 20º.

2. Ídem que fig. 1. La oblicuidad es mayor de 20º. Las juntas son, en proyección horizontal, líneas curvas.

3. Ídem. El arco se abre en una esquina de un edificio o construcción.

4. Ídem. El arco se abre en muro cilíndrico. La intersección se determina con ayuda de la cuña de Wallis. Aquí se ha partido del arco abatido sobre el plano horizontal de proyección (4^{a}). En la fig. 4^{b} se ha dado una proyección oblicua del método seguido.

5. Ídem. El arco se abre en un muro cuyo espesor cambia linealmente.



1ᵇ Proyección vertical

2ᵇ Proyección vertical

1ᵃ Proyección horizontal

2ᵃ Proyección horizontal

1ᶜ Trazado de los planos de junta

2ᶜ Trazado de los planos de junta

1. Apertura de puerta en una construcción abovedada exteriormente en forma de cono.

2. Hueco de puerta en construcción abovedada, acabada en el exterior con un paramento inclinado

1 y 2. (figs. 1ᵃ, 1ᵇ, 2ᵃ, 2ᵇ, 2ᶜ). Determinación de los cortes de piedra y trazado de los planos de junta en construcciones abovedadas. En 1ᵇ y 2ᵇ se han indicado las secciones de las bóvedas junto con las proyecciones verticales. En algunos casos estas secciones se pueden trazar por comodidad (la pendiente del cono y la curvatura de la cúpula o de la bóveda de cañón) a la izquierda o derecha en las figs. 1ᵇ y 2ᵇ. Se parte de la proyección vertical la cual se toma según el entendimiento del constructor. Después se determina la verdadera longitud de las juntas en los planos oblicuos externos que limitan las construcciones (ver 1ᵇ y 2ᵇ). En el trazado de los planos de junta se llevan estas longitudes. Las distancias x, y, *etc. y* w, o, *etc. siendo éstas las distancias de puntos de las bóvedas hasta la superficie curva o plana que es perpendicular al suelo y que pasa por el pie de la construcción; se llevan también tanto en las proyecciones horizontales como en el trazado. Las juntas de,* cg, ab, *etc. y también* d°e°, c°g°, a°b°, *etc. son líneas curvas de las que es posible determinar puntos intermedios.*

2
Construcción

2.1 La unión de la bóveda con los demás elementos del edificio

No es suficiente que el constructor proyecte una bóveda calculada cuidadosamente, en la que la ejecución sea impecable y la forma haya sido determinada de forma correcta. Una bóveda ejerce mi empuje lateral sobre los muros y sobre los pilares sobre los que descansa; puede recibir el empuje de la bóvedas secundarias o está quizás cargada por otras partes de la construcción que apoyan sobre ella. Por eso un cálculo y la determinación de las líneas de empujes en una bóveda no puede considerarse más que un intento para la comprensión del presumible discurrir de los esfuerzos. Actúan tantos factores juntos no obtenibles de los cálculos que no puede bastar dicho cálculo: la comprensión técnica y la experiencia tienen que decidir cómo hacer la bóveda y qué fallos en la construcción o qué consecuencias de una ejecución insatisfactoria pueden ser previstos.

En la ejecución se depende de la mayor o menor profesionalidad de los operarios, de la solidez de los materiales usados, etc. Los principales puntos a los que se debe prestar atención son los siguientes se estudian a continuación:

CIMENTACIONES: La cimentación de los muros y pilares de apoyo debe ser buena; el suelo seguro y fiable no debe ser cargado en exceso, procurando una distribución uniforme de tensiones. Si esto no es así, se producirán asientos diferenciales que causarán grietas en las bóvedas.

SOLIDEZ: Los muros, pilares y columnas tienen que ser suficientemente resistentes; la tensión en los materiales no puede ser muy grande, y los pilares y muros deben ser construidos, en tanto que sea posible, con materiales de la misma clase. Con frecuencia los muros presentan al exterior un paramento de piedra dura, pero por dentro constan de un relleno de cascote y materiales de deshecho; esto conduce a asientos desiguales y agrietamientos en las bóvedas.

La magnitud de los asientos depende del número y espesor de las juntas. Los sillares de piedra deben ser colocados con una junta gruesa y del mismo espesor en todas partes; el método por el cual las juntas se hacen delgadas al exterior pero gruesas por dentro, esto es, el corte troncopiramidal de la junta, que deja una tirada en el perímetro y un rehundido central, puede tener consecuencias funestas. La tensión se concentra en el borde de las piedras y esta tensión puede llegar a ser tan grande que las piedras se fracturen. (Ver «La cúpula del Panteón de París», pag. 288), más adelante.)

Por otra parte, tampoco es adecuado hacer que los planos de junta de las piedras de las bóvedas estén totalmente escuadrados al colocarse unas sobre otras. Esto es válido, sobre todo, para los nervios de las bóvedas de crucería donde, por la gran tensión en los planos de junta, las piedras podrían abrirse; resulta entonces aconsejable dar una ligera oblicuidad hacia el trasdós, haciendo las juntas un poco más anchas hacia el exterior.

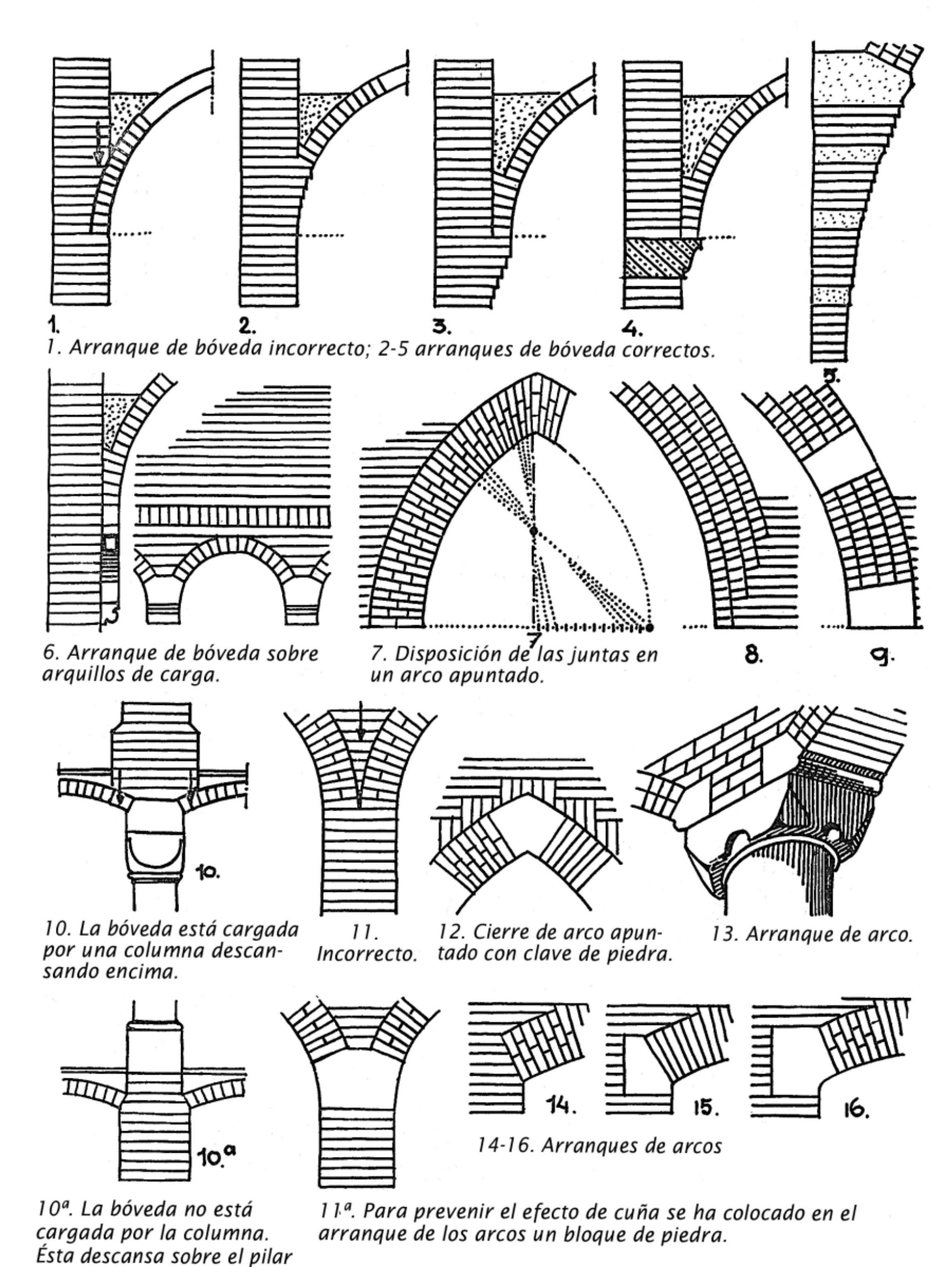
En ocasiones, las piedras se asientan sobre cuñas de madera que se olvida retirar más tarde. Al retraerse el mortero las piedras descansan sobre las cuñas con lo que pueden producirse roturas y desconchones.

Hay que tratar de conseguir que las juntas no sean demasiado gruesas, si bien el espesor debe ser suficiente para que las piedras descansen totalmente sobre el lecho de mortero. A veces se intenta favorecer la distribución uniforme asentando las piedras sobre láminas de plomo; esto es aconsejable en bóvedas de piedra natural.

En arcos gruesos y en bóvedas de cañón de varias roscas superpuestas, el número de juntas en cada rosca debe ser, en la medida de lo posible, el mismo.

Para ello, las roscas se disponen en el arranque cada vez un poco más altas, o bien se divide el arco en un número de partes iguales, entre las que se colocan bloques de piedra (Lám. 15, figs. 8, 9). A veces se hacen también las claves de

LÁMINA 15. ARRANQUES Y CLAVES DE ARCOS



1. Arranque de bóveda incorrecto; 2-5 arranques de bóveda correctos.

6. Arranque de bóveda sobre arquillos de carga.

7. Disposición de las juntas en un arco apuntado.

10. La bóveda está cargada por una columna descansando encima.

11. Incorrecto.

12. Cierre de arco apuntado con clave de piedra.

13. Arranque de arco.

14-16. Arranques de arcos

10ª. La bóveda no está cargada por la columna. Ésta descansa sobre el pilar inferior previniéndose el peligro de grietas.

11ª. Para prevenir el efecto de cuña se ha colocado en el arranque de los arcos un bloque de piedra.

8-9. El número de juntas en las diferentes roscas del arco se hace igual en la medida de lo posible.

piedra, lo que resulta mucho más aconsejable que hacerlas de albañilería con ladrillos delgados o rasillas, tal y como todavía se ve en algunos lugares; las múltiples juntas causan más retracción y, por tanto, mayores asientos. La clave se debe labrar cuidadosamente y nunca se debe introducir con violencia ya que entonces dificulta el fraguado del mortero.

Pocas construcciones son tan dependientes de las eventualidades como las bóvedas. Interrupciones durante la construcción o diferencias en la velocidad de ejecución tienen influencia. Así mismo la tienen, el asiento de algunas hiladas con poca pasta mientras otras se colocan flotantes en abundante mortero; la mayor o menor flexibilidad de la cimbra de apoyo, etc.

La tensión admisible en las bóvedas no puede ser muy alta; normalmente se considera que se puede admitir:

– piedra volcánica, 0,2–0,3 N/mm^2;
– piedra porosa, 0,3–0,5 N/mm^2;
– ladrillo bien cocido sobre mortero de cal, 0,7 N/mm^2;
– klinker o ladrillo de gran dureza con mortero de cemento, 1,1–1,4 N/mm^2;
– piedra natural, 0,7–2,0 N/mm^2.

CONTRARRESTO: El empuje ejercido por las bóvedas tiene que ser contrarrestado, bien con tirantes, o bien con pesados machones de estribo. El gran arte de la construcción abovedada reside en esto, en la eficaz colocación de las partes de manera que los empujes queden neutralizados.

Desde un punto de vista constructivo, todo el desarrollo de la construcción abovedada medieval puede reducirse a la evolución de la lucha contra el empuje. Los grandes constructores de bóvedas de Occidente han realizado sorprendentes hallazgos en sus intentos para mantener las partes de una construcción abovedada en equilibrio unas con otras.

La mayoría de las grietas en los paños de las bóvedas tienen su causa en apoyos insuficientes en sentido lateral, es decir, por falta de contrarresto. Según Rondelet, el daño sufrido en edificios causado por el empuje de bóvedas es más de temer que el que originan los asientos. El primero estará, por cierto, en lugar de en disminución, en continuo aumento. Una vez que el empuje empieza a trabajar y los apoyos se desplazan, la resistencia al vuelco disminuye

mientras que el empuje continúa aumentando. El más ligero movimiento o vibración es causa de que el empuje haga nuevos progresos, con lo que el edificio se llega a arruinar si dicho empuje no se logra contrarrestar adecuadamente.

Una grieta que surja en una zona débil de la bóveda tiene tendencia a proseguir. Las grietas son sobre todo peligrosas en las bóvedas de cañón, ya que se producen tanto en la línea clave, en la dirección del eje, como sobre los muros de apoyo. Por eso los arranques de la bóveda deben estar bien cargados, macizados hasta la altura en que las grietas se podrían producir. Los pesados arcos fajones, que se ven con frecuencia en las bóvedas de cañón, y cuyo papel de refuerzo es dudoso, sí son útiles para frenar la propagación de las grietas en sentido longitudinal.

El empuje lateral de las bóvedas es recibido por los muros sobre los que apoyan. Por eso el peligro de que esos muros reciban una carga excéntrica es grande, ya que con ello podrían surgir tracciones o como mínimo tensiones desiguales. En los cálculos de estabilidad deben tenerse, por tanto, muy en cuenta las posibles cargas excéntricas.

2.2 El material de las bóvedas

Las bóvedas se hacen de piedra natural o artificial, tal como el ladrillo, las piedras de escoria, etc., y de combinaciones de estos materiales. Las construcciones de fábrica resisten bien las compresiones, pero pueden asumir muy reducidas tracciones, preferiblemente, ninguna.

Las esquinas agudas deben ser en la medida de lo posible eliminadas, tanto en fábricas de ladrillo como de piedra, a causa del peligro de rotura.

Las partes de la bóveda expuestas a fuertes tensiones, se construyen normalmente de piedra dura, mientras que para los rellenos, por ejemplo en los paños de bóvedas, se usa piedra más ligera. Así, en las bóvedas nervadas se harán de piedra los arranques y quizá también los nervios, y de ladrillo o piedra volcánica la plementería. El ladrillo se tratará que sea todo lo ligero posible; se puede hacer uso ventajosamente de material cerámico provisto de agujeros en la dirección longitudinal, verificando su buena cocción, o de ladrillo poroso, cocido con una

mezcla de arcilla y escorias. Por las mismas razones la plementería se realiza con ladrillos de pequeño tamaño, por ejemplo el tipo Ijsel, que es más fácil de trabajar en superficies curvadas que el tipo Waal, más grande.[1]

Cuando se emplea piedra, es preciso un replanteo previo, pues la técnica está más condicionada que con el trabajo en ladrillo. Los bloques de piedra tienen que estar labrados y listos para el montaje en obra, mientras que el albañil da al ladrillo en el andamio la forma deseada.

Es deseable que, en lo posible, el material se coloque en hiladas de igual composición. Se ha de tener en cuenta el fenómeno de la retracción del mortero y por eso, por ejemplo, en los rellenos se empleará un mortero pobre, porque en ellos hay mucho material susceptible de retracción.

2.3 Ejecución de las bóvedas

La construcción de bóvedas plantea numerosos problemas. En primer lugar, cómo se apoyarán las bóvedas durante la ejecución. La mayoría de las veces se colocan bajo ellas armaduras de madera en arco, las cimbras, que han de estar bien apuntaladas y clavadas con listones, lo que supone un costoso y laborioso trabajo de carpintería.

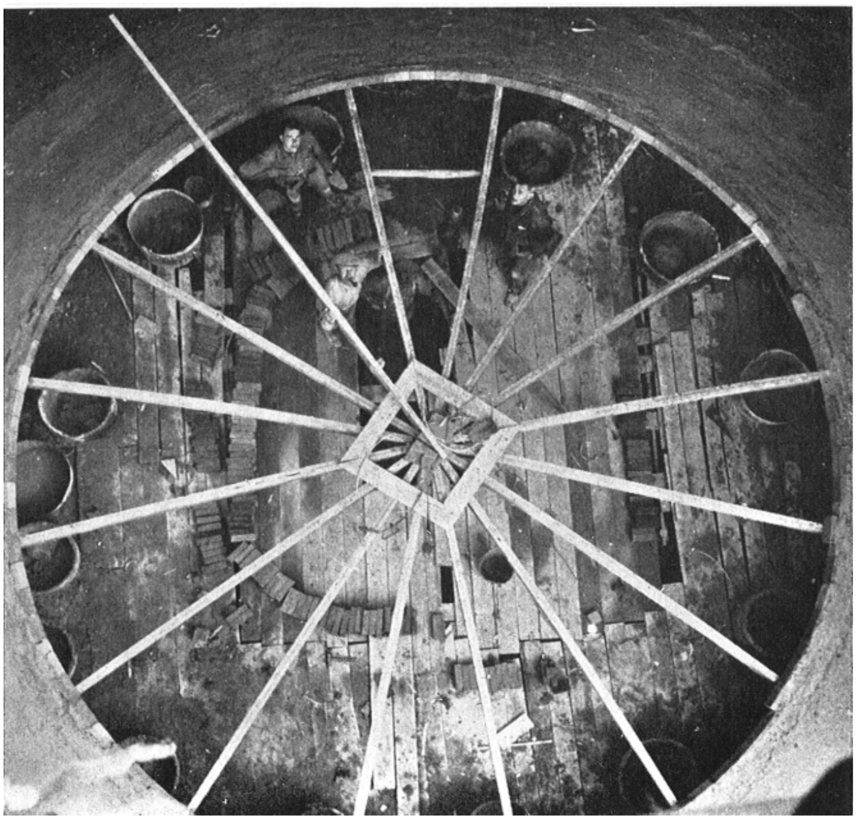
Se intenta, por eso, en todo lo posible, ahorrar trabajo de cimbrado eligiendo métodos en los que durante la ejecución los ladrillos se mantengan en equilibrio. En la construcción oriental fue desarrollándose a lo largo de los siglos una técnica en la que las bóvedas se construían sin cimbras, el aire, por hojas adosadas (ver págs. 101 y ss.).

En la Edad Media, por las mismas razones, los constructores dieron a los paños de las bóvedas un curvado cupuliforme, el llamado abombamiento.

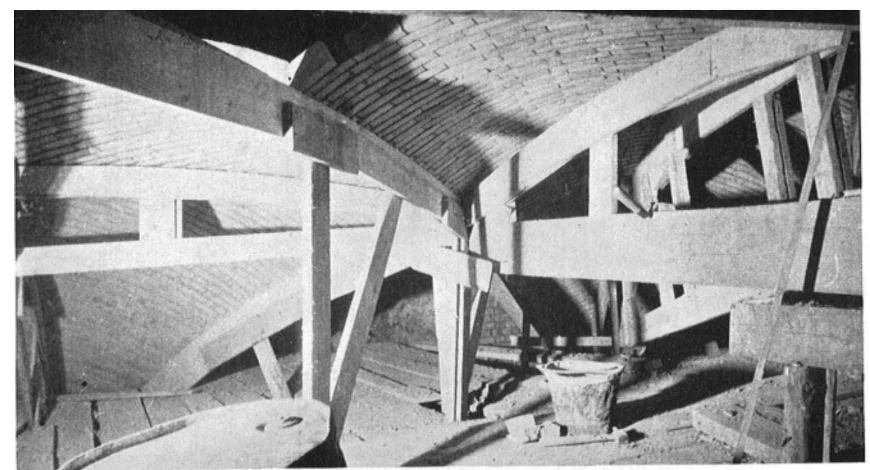
En la construcción con cimbras el constructor debe contar con que no reciben la misma carga de la bóveda en toda su longitud: la parte inferior apenas recibe carga mientras que la carga cercana al vértice puede ser muy grande. En bóvedas rebajadas la coronación muestra tendencia a bajar al endurecerse el mortero, de

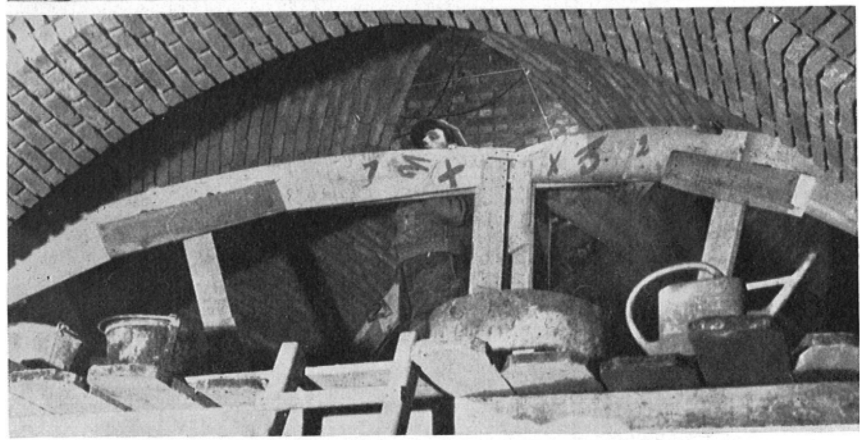
1 Se refiere a formatos de ladrillo entonces usuales en Holanda, y que toman sus nombres de los ríos Ijsel y Waal respectivamente. N. del T.





Arriba. Ejecución de una cúpula de cáscara
Abajo. Arcos de forma para una cúpula de cáscara







Arriba. Cimbrado de una bóveda de arista
Medio. Ejecución de una bóveda de arista
Abajo. Construcción de un luneto en una cúpula

manera que la cimbra se debe trazar algo más alta para que la bóveda después del asentamiento tenga la forma adecuada.

En el montaje de la cimbra se tiene que pensar ya directamente en *cómo* se va a descargar. La forma de la descarga influye en la magnitud del asiento de la bóveda tras su ejecución.

La manera y el momento del descimbrado dependen del mortero usado.

En los siglos pasados las fábricas se realizaban con mortero de endurecimiento relativamente lento; actualmente se usa en general mortero de cemento, que fragua rápidamente y, por ello, se hace muy inelástico. La buena práctica antigua conllevaba que la cimbra se bajara ligeramente justo después que se cerrara la bóveda; se producían entonces pequeños movimientos y la bóveda se acomodaba, «buscando su forma más adecuada».

El mortero blando favorece un reparto uniforme de tensiones en la bóveda. Después del endurecimiento del mortero, el empuje se produce sobre todo en la dirección en donde la resistencia es mayor. Si un punto de apoyo no puede resistir todo el empuje lateral de una bóveda, cede ligeramente, entonces la bóveda cambia de forma mientras que se reduce el empuje sobre el apoyo. Este cedimiento del apoyo y el consiguiente cambio de forma de la bóveda progresa, bien hasta que se empieza a encontrar un estado de equilibrio, o bien hasta que la bóveda colapsa. Si la construcción o la forma de la bóveda no son buenas, puede suceder una catástrofe. En las buenas construcciones el mortero blando es responsable de que la forma de la bóveda desde el punto de vista estático sea todo lo favorable posible.

No obstante, si el mortero es demasiado blando la bóveda se puede deformar demasiado, lo que también es peligroso para la estabilidad. Se tiene así, por un lado, que evitar aplicar un mortero demasiado blando y, por otro, es aconsejable que el mortero permita un determinado cambio de forma de la bóveda.

Con la aplicación de morteros de rápido endurecimiento la situación es totalmente diferente. El mortero de la parte de la bóveda que se ejecuta primero puede haber fraguado por completo para cuando la bóveda se ha cerrado. Cuando se baja la cimbra, la última parte ejecutada de la bóveda desciende pero no la primera, por lo que son posibles deformaciones desiguales de la bóveda. Es mejor entonces

dejar cimbrada la bóveda hasta que se esté seguro de que todo el mortero haya endurecido.

La forma de la bóveda debe ser tal que no pueda surgir ningún reparto de tensiones inconveniente. Las tensiones de tracción son inadmisibles en las construcciones abovedadas.

En la construcción de bóvedas de ladrillo hay que tener en cuenta que cada albañil trabaja de una manera propia y diferente. En la ejecución de grandes bóvedas es importante intercambiar de vez en cuando a los albañiles para obtener un trabajo que sea en todo lo posible de la misma calidad.

Las bóvedas que están expuestas a gran temperatura (como hornos de fábrica y otras), en las que puede darse lugar a grandes tensiones internas, se ejecutan normalmente con arcilla refractaria y a menudo incluso con ladrillos sin cocer. (Nótese que dichas bóvedas pueden asentar separadas de los muros testeros.)

Donde exista una gran rigidez, como en el arranque de bóvedas y arcos, se puede usar mortero de cemento, aunque para la ejecución de los paños, sobre todo cuando éstos se tienen que construir sin cimbra, es mejor elegir un mortero duro de cal, que después del fraguado permanece más blando que el de cemento. Ambos morteros asientan de diferente manera. Por eso debe evitarse extender mortero de cemento hasta una altura demasiado grande; una extensión en dirección lateral de la fábrica realizada con cemento es sin embargo favorable, ya que ésta favorece la transmisión de los empujes sobre una superficie mayor. Sí que debe tenerse en cuenta el inconveniente de que los albañiles tienen que usar dos clases de morteros, con el riesgo de cometer equivocaciones, por lo que es necesaria una buena supervisión.

Resulta evidente que con nuestras actuales pastas de cemento de rápido endurecimiento es de mayor importancia que antes dar a la bóveda la forma del presumible discurrir de las líneas de empujes.

Las bóvedas de pequeño espesor se ejecutan también con mortero de yeso. Damos una detallada descripción de este método más adelante (págs. 234 y ss.).

Para absorber eventuales tensiones de tracción que pudieran aparecer en las construcciones a pesar de los cuidados adoptados, se recomienda introducir algunos tirantes de hierro en los arcos y bóvedas grandes. Un constructor precavido ni siquiera considerará esto suficiente; hará un atirantado continuo en la fá-

brica que una todas las partes. En esto es necesaria una buena comprensión del tema, ya que los tirantes nunca deben estar expuestos a la oxidación; también deben considerarse las grandes tensiones locales que puedan ocasionarse en la fábrica.

Las direcciones de las juntas pueden disponerse de diferentes formas. La manera en la que se haga determina en gran parte la forma del abovedado, sea con cimbra o al aire, esto es, sin cimbra. Si se ejecutan al aire, en la mayoría de los casos se colocan no obstante algunos elementos de carpintería, por ejemplo arcos de forma de madera, para determinar la forma de las bóvedas. La fábrica se mantiene algunos centímetros separada de las formas para que pueda asentar con libertad. Los ladrillos o piedras se colocan con sus planos de junta de tal manera que las hiladas se solapen unas con otras. La dirección se tiene, por tanto, que determinar con orden y conocimiento de la fábrica.

Un ordenado corte de la piedra puede facilitar al máximo la ejecución. Es importante que no se desaproveche demasiada piedra; esto ahorra trabajo innecesario y despilfarro de material.

La dirección en que se colocan las juntas tiene poca o ninguna influencia en la estabilidad final de una bóveda. La *forma* de la bóveda y el *peso propio* de la fábrica, por el contrario, sí. En el análisis estático de un arco (o de una bóveda de cañón) no se hace ninguna diferencia entre si ésta, en una parte, se hace con piedras en hiladas horizontales o si las piedras se disponen todas en forma radial.

La dirección de las juntas sí puede influir sobre el discurrir de las grietas, que tienden a seguir el curso de las juntas, y también sobre la mayor o menor sencillez con que se haga la ejecución. Esto es de interés sobre todo en la colocación de las hiladas de cierre en la clave.

Si la bóveda se ejecuta sobre una cimbra cerrada, entonces se debe cuidar que el mortero no quede detenido por el entablado superior. La hilada de cierre se deja separada de la cimbra, sobre todo en bóvedas rebajadas. En ningún caso la hilada final debe ser introducida con violencia.

Arcos y bóvedas de cañón

En la ejecución de nuestras construcciones abovedadas de Occidente, éstas se apoyan por lo regular en una cimbra de madera, sobre la que se clavan tablas o listones. En Oriente, por el contrario, se emplean solamente cimbras para los arcos de cabeza, eliminando posteriormente los apoyos, y construyendo la bóveda propiamente dicha sin cimbras. (Ver apartado 4.2, la construcción abovedada bizantina).

Para poder bajar la cimbra sin grandes sacudidas, se ajusta ésta sobre cuñas o, incluso mejor, sobre gatos o cajones de arena (Lám. 16, figs. 5, 6, 7). En este último caso, dejando salir lentamente la arena se obtiene un descenso homogéneo.

Antiguamente las cimbras se hacían de manera que permitían algún movimiento; actualmente se prefieren las de construcción rígida que constan de planchas o tablas clavadas o unidas por pernos. Se rigidizan mediante la colocación de riostras que triangulan la armadura y, más adelante, se colocan las necesarias vigas tirante. Los soportes de la cimbra se hacen también rígidos; a veces constan de varios postes que se ajustan con cuñas dobles. Después del ajuste se unen mutuamente por medio de listones rigidizadores.

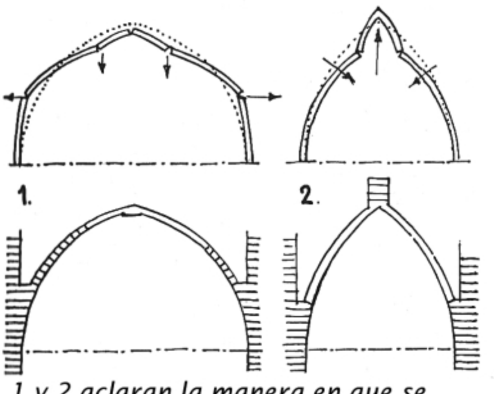
En bóvedas colocadas a gran altura, las cimbras no se intentan apoyar desde el suelo, sino que se apoyan sobre perfiles salientes de la construcción.

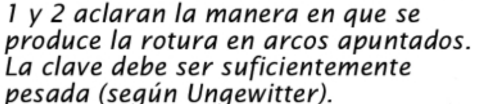
Sobre todo en el Renacimiento y el Barroco, se hicieron bellas construcciones de madera para cimbras, proyectadas por hábiles maestros (Lám. 102, fig. 2; Lám. 104, fig. 6).

Por lo regular las bóvedas se construyen después de que el edificio quede techado. Cuando esto por una u otra razón no es posible, las bóvedas de albañilería pura deben ser cuidadosamente recubiertas con papel de asfalto, sobre el cual se esparce una gruesa capa de arena, de manera que la lluvia o cualquier eventual caída de cascotes no puedan causarles ningún daño.

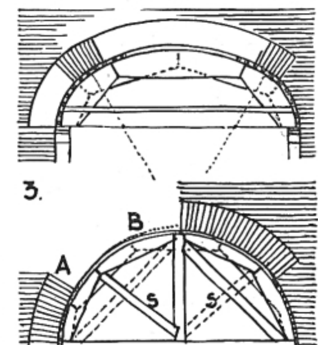
Se tiene que tener en cuenta por anticipado dónde se sitúan las juntas de agrietamiento del arco o bóveda. En una bóveda recta semicircular éstas se encuentran aproximadamente a 30º sobre el arranque de la bóveda. Cuando es posible, se realizan hiladas horizontales de albañilería hasta ésta posición; en cualquier caso la construcción debe macizarse hasta el nivel estas juntas (Lám. 15, fig. 2-6).

LÁMINA 16. CIMBRAS



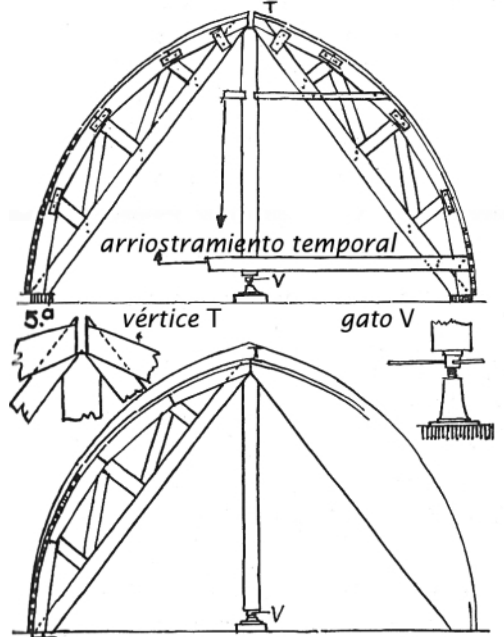


1 y 2 aclaran la manera en que se produce la rotura en arcos apuntados. La clave debe ser suficientemente pesada (según Ungewitter).

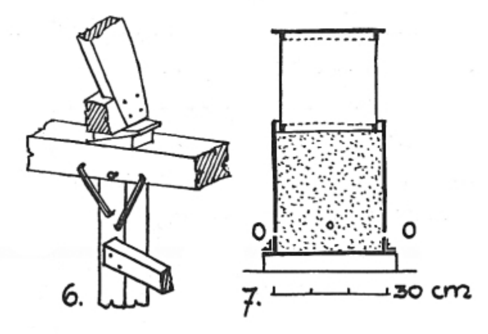


3. Cimbra para un arco oval

4. Cimbra para arco de medio punto. Hasta el punto A no se ejerce presión sobre la cimbra. Durante la ejecución de la parte A-B la clave tiene tendencia a elevarse; cuando se cierra el arco la clave descenderá; para evitar ambos efectos, se disponen los puntales y riostras.



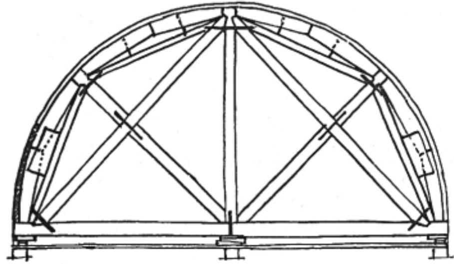
5b Construcción de cimbra según los arquitectos Hooykaas y Lockhorst para arcos de 5-20 m de luz. Bajando el gato V las dos partes de la cimbra se juntan y bajan con lo que ésta se descarga (ver figs. 5ª y 5b).



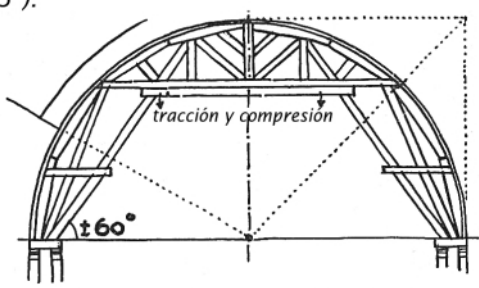
6. Cimbra apoyada sobre cuñas.

7. Cajón de arena lleno de arena seca. Se deja salir lentamente la arena por los orificios O. Si es preciso se puede poner en movimiento la arena con un palito.

8. Cimbra sobre sacos de arena (según C. Körner).



9. Cimbra para arcos de 5-10 m de luz.



10. Cimbra para arcos de 10-25 m de luz.

También requiere especial atención el cierre de la clave de los arcos y bóvedas. En arcos se hace a menudo con piedra.

En bóvedas apuntadas la clave tiene tendencia a irse hacia arriba, de forma que debe cargarse temporalmente hasta que la bóveda esté totalmente ejecutada. Esto es importante sobre todo al hacer los nervios de las bóvedas de crucería, que a veces se agrietan y colapsan juntando sus lados y elevando su clave, lo que ocasiona daños irreparables (Lám. 16, figs. 1, 2).

La dirección de las hiladas de ladrillos se puede elegir de diferentes maneras. En primer lugar las llagas pueden ir paralelas a los muros de apoyo; en segundo lugar pueden ir perpendiculares a esa dirección y en tercer lugar pueden colocarse, vistas en proyección horizontal, bajo ángulos de aproximadamente 45º con los muros de apoyo y testeros. En este último caso se han de colocar también esperas de apoyo en los muros testeros.

En bóvedas con escasa flecha, por ejemplo en bovedillas de pisos, se da a veces una ligera elevación en sentido longitudinal para reforzarlas. Las posibilidades de colocación de las distintas hiladas no quedan sin embargo con esto en absoluto agotadas. Se profundizará sobre esta cuestión más adelante en la descripción de las bóvedas bizantinas.

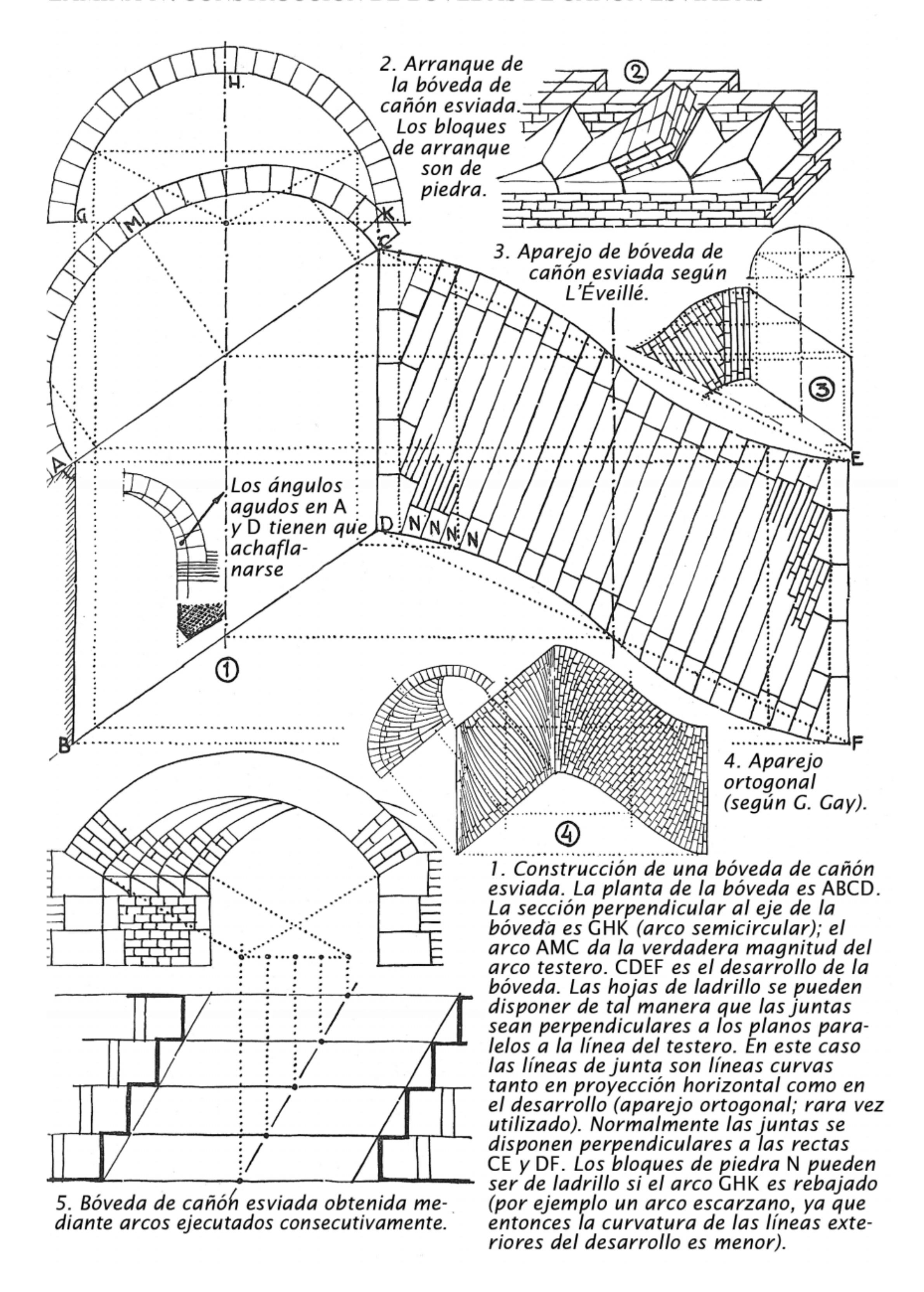
Si se hacen rehundidos en las bóvedas, por ejemplo, casetones, entonces se colocan losetas o moldes sobre el tablazón de madera sobre los cuales se ejecuta la fábrica; la trabazón debe hacerse de forma muy cuidadosa (Lám. 18, fig. 4; Lám. 23, fig. 6).

Se deben evitar repentinos cambios en el espesor de la bóveda, pues tienen una influencia desfavorable en el reparto de tensiones. También puede deparar inconvenientes la colocación de cargas puntuales sobre los arcos o bóvedas; esto ocurre alguna vez cuando se tienen que apoyar temporalmente muros o pilares sobre ellas.

Bóvedas esviadas

En puentes es frecuente tener que construir bóvedas esviadas, que ofrece diferentes posibilidades, tanto en la determinación del corte de las juntas como en su ejecución. Estas bóvedas se pueden hacer de ladrillo, con las hiladas discurriendo paralelas al eje, si en los extremos de la bóveda se colocan piedras sobresalientes

LÁMINA 17. CONSTRUCCIÓN DE BÓVEDAS DE CAÑÓN ESVIADAS



2. Arranque de la bóveda de cañón esviada. Los bloques de arranque son de piedra.

3. Aparejo de bóveda de cañón esviada según L'Éveillé.

4. Aparejo ortogonal (según G. Gay).

5. Bóveda de cañón esviada obtenida mediante arcos ejecutados consecutivamente.

1. Construcción de una bóveda de cañón esviada. La planta de la bóveda es ABCD. La sección perpendicular al eje de la bóveda es GHK (arco semicircular); el arco AMC da la verdadera magnitud del arco testero. CDEF es el desarrollo de la bóveda. Las hojas de ladrillo se pueden disponer de tal manera que las juntas sean perpendiculares a los planos paralelos a la línea del testero. En este caso las líneas de junta son líneas curvas tanto en proyección horizontal como en el desarrollo (aparejo ortogonal; rara vez utilizado). Normalmente las juntas se disponen perpendiculares a las rectas CE y DF. Los bloques de piedra N pueden ser de ladrillo si el arco GHK es rebajado (por ejemplo un arco escarzano, ya que entonces la curvatura de las líneas exteriores del desarrollo es menor).

en forma escalonada y fuertemente ancladas, ya que existe peligro de que sean empujadas hacia fuera.

La forma más evidente para hacer todas las juntas ortogonales es trazarlas en perpendicular al arco testero de la bóveda y después a todas las líneas que se puedan trazar paralelas a ella sobre el intradós de la bóveda (Lám. 17, fig. 4). Para ello se desarrolla la superficie del intradós de la bóveda. En la planta se ha dibujado con anterioridad un conjunto de líneas paralelas a la proyección de la línea del arco testero; el desarrollo de estas líneas son sinusoides.

Las hiladas salen entonces de anchos muy diferentes entre sí. En los finales de la bóveda, es decir en los arranques, discurren en forma acuñada de manera que se está obligado a encajar gran número de piezas de lados convergentes. Las juntas discontinuas se trazan perpendiculares a la dirección de las hiladas longitudinales. Este aparejo, llamado «ortogonal» o francés exige una ejecución muy exacta no solo porque la forma de las piedras tiene que determinarse con precisión, sino también porque el número de juntas es muy diferente en las diversas partes de la bóveda, lo que puede causar asientos desiguales. Por esta razón las juntas se hacen todo lo delgadas posible para eliminar las consecuencias negativas de la retracción del mortero.

El aparejo se simplifica dirigiendo las líneas de junta perpendiculares a la línea que une las esquinas del arco testero una vez desarrollado sobre un plano horizontal de proyección. Las hiladas son ahora de igual ancho en todas partes; ya no son paralelas a la sinusoide, pero en bóvedas rebajadas, por ejemplo en las que la sección es una elipse o un arco de circunferencia, el error cometido es muy pequeño (Lám. 17, fig. 1). Este aparejo se conoce como inglés o helicoidal. Los ingenieros franceses, sobre todo, han adoptado mejoras en este método, con lo que puede ser aplicado en bóvedas altas o peraltadas; por ejemplo, cuando la sección perpendicular al eje de la bóveda es un semicírculo, o incluso un arco más peraltado. Un ejemplo de ello es el aparejo denominado de L'Éveillé (Lám. 17, fig. 3).

Normalmente, en estas bóvedas se usa en gran medida la piedra. Éstas deben ser ancladas de forma muy experta; esto es necesario sobre todo, en los bloques en donde se producen las transiciones del aparejo, es decir en los que se ejerce presión desde dos lados.

Los arranques se tendrán que hacer generalmente de piedra natural, pero es posible disponer las hiladas en el resto de partes de la bóveda de tal forma que se puedan ejecutar con ladrillo. Ya que estas construcciones no son frecuentes en la arquitectura civil no se profundizará más en ello.

Bóvedas helicoidales

Las escaleras helicoidales de fábrica apoyan en bóvedas de cañón en pendiente helicoidal hacia arriba. A tales bóvedas se les da también el nombre de bóvedas de caracol. La línea directriz es la mayoría de las veces un arco de círculo.

La bóveda de caracol de apoyo sigue la dirección marcada por la parte inferior de los peldaños. La construcción geométrica se describe a continuación.

Se determinan la huella y tabica de la escalera. Las huellas se disponen en la planta. Ahora se puede dibujar el desarrollo de la sección de la escalera a lo largo del muro y del pilar central (Figura 4, figs. 1 y 2). La altura de la contrahuella se determina a voluntad.

El espesor de la bóveda se traza a continuación en las dos secciones desarrolladas determinando entonces las proyecciones de los puntos *y, z,* siendo los puntos de corte de la parte inferior de la bóveda (en la posición del lado delantero de uno de los peldaños, en este caso el peldaño *t*) con el muro de la escalera y el pilar central. La sección vertical por el peldaño *t* puede también dibujarse. Para la sección inferior de la bóveda se toma por ejemplo un arco de circunferencia del cual ya están determinados los puntos *y'* y *z'*. Se da a este arco una flecha *p;* después se determinan todos los puntos. El intradós de la bóveda de caracol se puede ahora obtener moviendo este arco de círculo a lo largo de una hélice determinada por una de las secciones (desarrolladas) de la escalera a lo largo del muro o a lo largo del pilar central. Se pueden a continuación dibujar tantas secciones de la escalera como se deseen; aquí se ha dibujado la sección por la línea media de los peldaños en forma desarrollada (Figura 4, fig. 3).

Su ejecución requiere mucha habilidad, ya que los albañiles prefieren hacerla sin cimbra, después de señalar la dirección sobre una plantilla o sobre los muros. Para el arranque de las bóvedas se abre una roza o espera en la albañilería. También se hace en el pilar central. La mayoría de las veces el pilar central se ejecuta

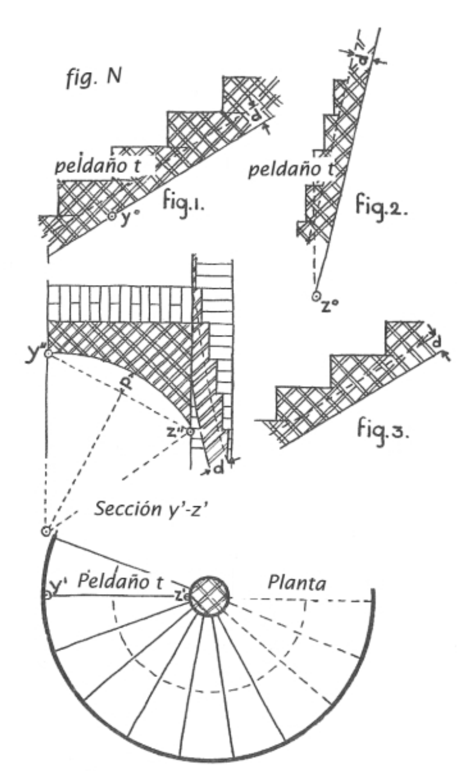


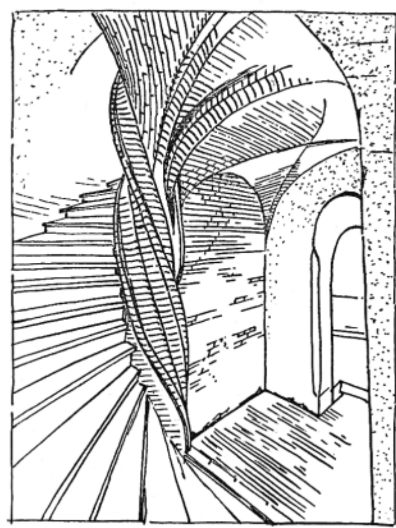
Figura 4. Construcción de una escalera helicoidal

al mismo tiempo que la bóveda. Con un listón curvado se controla continuamente la dirección de la bóveda.

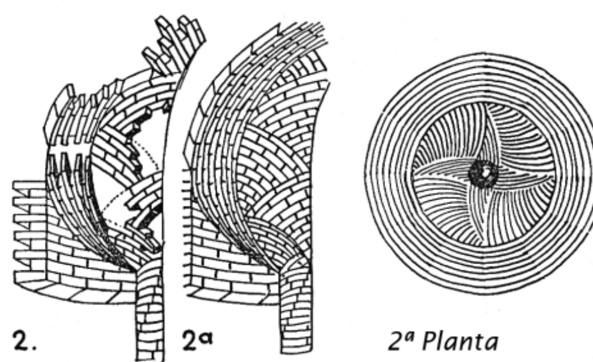
Se puede hacer uso ventajosamente del método habitual en Italia de bóvedas tabicadas con los ladrillos sentados de plano, teniendo libertad para colocar los ladrillos en «aparejo en espina pez», o incluso en formas más libres (Lám. 85, fig. 5; Lám. 86, fig. 2).

En el lado del pilar central se ha de superar la dificultad de la gran inclinación, por lo que no es muy fácil adaptar los ladrillos en la dirección de la línea de arranque. La mayoría de las veces se hace la mitad de la bóveda, la correspondiente al lado del apoyo central, con trenzados de manera que la dirección de las juntas puede hacerse aproximadamente perpendicular al arranque del pilar. Este último ha de tener como mínimo 30 cm de sección (Lám. 18, fig. 2 y 2a).

LÁMINA 18. BÓVEDAS DE CARACOL. CONSTRUCCIÓN DE CÚPULAS Y BÓVEDAS DE CAÑÓN



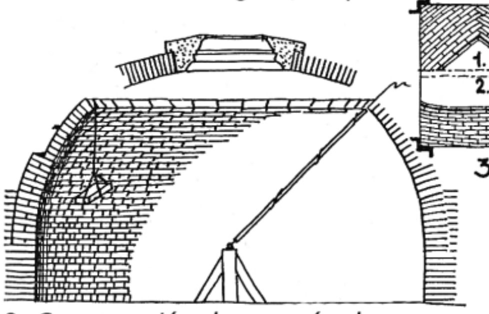
1. Escalera de caracol en el claustro de Santa Ágata, Delft.



2. Construcción de una bóveda de cañón helicoidal. Tanto el pilar como la bóveda se ejecutan después de que el edificio esté terminado, cuando la fábrica ha "asentado". Se describe sobre los muros la dirección de la bóveda (se pueden dejar esperas). Hay libertad en la manera de disponer las hojas de ladrillo (según Wanderley).

1.
2.
3ª

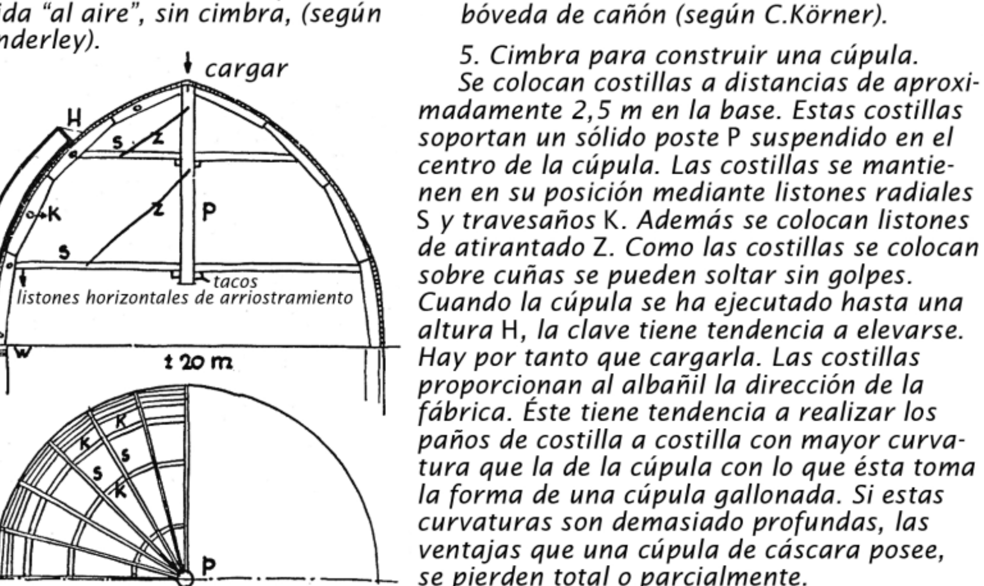
3ª (1-2) Disposición de las hojas en una bóveda bohemia.



3. Construcción de una cúpula construida "al aire", sin cimbra, (según Wanderley).

4.
4ª
4b

4. Construcción de los casetones de una bóveda de cañón (según C.Körner).



5. Cimbra para construir una cúpula.

Se colocan costillas a distancias de aproximadamente 2,5 m en la base. Estas costillas soportan un sólido poste P suspendido en el centro de la cúpula. Las costillas se mantienen en su posición mediante listones radiales S y travesaños K. Además se colocan listones de atirantado Z. Como las costillas se colocan sobre cuñas se pueden soltar sin golpes. Cuando la cúpula se ha ejecutado hasta una altura H, la clave tiene tendencia a elevarse. Hay por tanto que cargarla. Las costillas proporcionan al albañil la dirección de la fábrica. Éste tiene tendencia a realizar los paños de costilla a costilla con mayor curvatura que la de la cúpula con lo que ésta toma la forma de una cúpula gallonada. Si estas curvaturas son demasiado profundas, las ventajas que una cúpula de cáscara posee, se pierden total o parcialmente.

5ª Planta.

Cúpulas

La cúpulas de media naranja se pueden ejecutar con ayuda de muy poco cimbrado. Lo único necesario es un eje a lo largo del cual se determina la dirección de la albañilería. Normalmente se coloca un poste en el centro de la cúpula. Éste se puede también colgar de un cierto número de arcos de camones unidos al poste central por puntales: el conjunto parece un paraguas con ballenas fijado a un palo. Entre los arcos se colocan travesaños o palos redondos de madera (estos palos se sitúan por tanto en el plano del perímetro de la bóveda), que mantienen a los arcos en posición. (Lám. 18, fig. 5). El albañil hace a continuación los paños de la bóveda al aire, con lo que trabaja desde el perfil de un arco al siguiente. La ejecución se simplifica si en cada paño entre arcos se da una curvatura algo mayor, con lo que la cúpula toma una sección ligeramente gallonada.

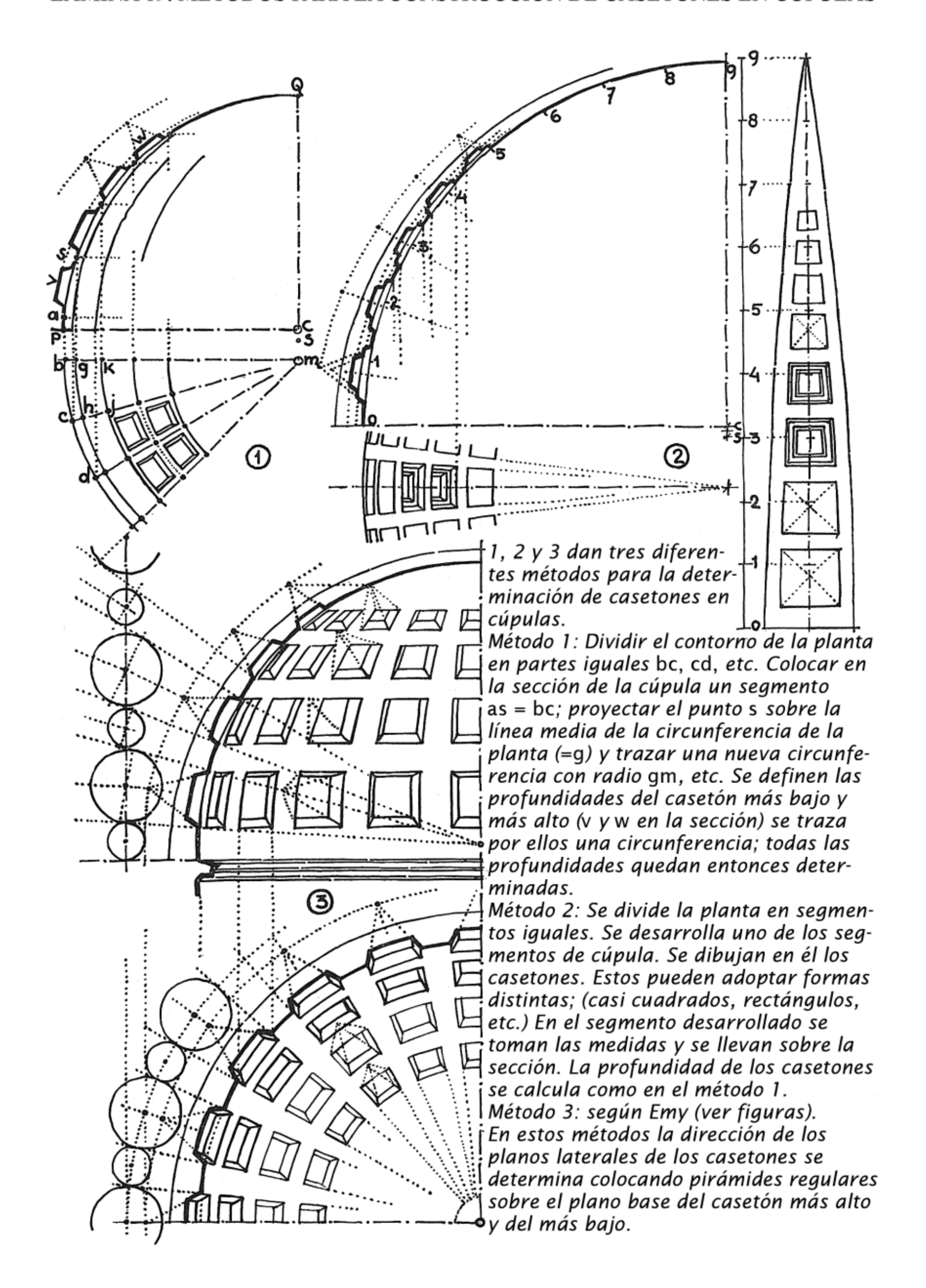
Estos gallones no deben ser muy profundos ya que entonces se pierden las buenas propiedades estáticas de la cúpula. El trabajo de cáscara de la cúpula se pierde y surge una cúpula impropia, una cúpula nervada, con propiedades análogas a las de las bóvedas nervadas, como se verá más detenidamente en el estudio de la cúpulas (Láms. 125-130, 132, 133, 140; apartado 5.3).

Si hay aperturas para iluminación o lunetos en la cúpula, las intersecciones se determinan por lo regular punto a punto. La fábrica de la coronación delantera de los lunetos debe mantenerse en equilibrio; para ello las zonas laterales de la cúpula de perforación no deben ser demasiado delgadas, tanto más cuanto que también deben servir para neutralizar eventuales empujes ejercidos localmente por la cúpula. Los lunetos se pueden considerar como bóvedas de cañón; por tanto deben también ser trasdosados un relleno. (Ver más adelante el apartado sobre lunetos.)

Si hay un óculo debe ser ejecutado sólidamente y bien trabado con la cúpula. Teóricamente el borde libre no necesita ser más resistente que el resto de la cúpula, pero se hace algo más grueso para estar a salvo de las perjudiciales consecuencias de los asientos.

Cuando al construir una cúpula se cierra un anillo los ladrillos se mantienen en equilibrio, aunque durante su ejecución los ladrillos deberán mantenerse suje-

LÁMINA 19. MÉTODOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CASETONES EN CÚPULAS



1, 2 y 3 dan tres diferentes métodos para la determinación de casetones en cúpulas.
Método 1: Dividir el contorno de la planta en partes iguales bc, cd, *etc. Colocar en la sección de la cúpula un segmento* as = bc*; proyectar el punto* s *sobre la línea media de la circunferencia de la planta (=*g*) y trazar una nueva circunferencia con radio* gm*, etc. Se definen las profundidades del casetón más bajo y más alto (*v *y* w *en la sección) se traza por ellos una circunferencia; todas las profundidades quedan entonces determinadas.*
Método 2: Se divide la planta en segmentos iguales. Se desarrolla uno de los segmentos de cúpula. Se dibujan en él los casetones. Estos pueden adoptar formas distintas; (casi cuadrados, rectángulos, etc.) En el segmento desarrollado se toman las medidas y se llevan sobre la sección. La profundidad de los casetones se calcula como en el método 1.
Método 3: según Emy (ver figuras).
En estos métodos la dirección de los planos laterales de los casetones se determina colocando pirámides regulares sobre el plano base del casetón más alto y del más bajo.

tos provisionalmente (sobre todo en la parte de la coronación). Para ello se usan medios muy sencillos, por ejemplo dejando colgar un ladrillo sujeto con un cordel (Lám. 18, fig. 3).

En cúpulas rebajadas, por ejemplo en la bóveda bohemia o vaída (Lám. 18, fig. 3), la mayoría de las veces las hiladas no se ponen según anillos, sino que se disponen desde las esquinas en perpendicular a las diagonales con lo que los ladrillos se traban alternadamente en el centro. Si se asientan por hiladas anulares, entonces, cuando se trata de bóvedas rebajadas, hay que dejar bastante tiempo antes de que los anillos sean estables. También se pueden disponer las juntas de las hiladas perpendiculares en planta a las líneas medias. En las cúpulas, los planos de junta se dirigen hacia el centro de la esfera.

El albañil puede también procurar el equilibrio de los ladrillos y contrarrestar el deslizamiento dándoles un falso abombado durante la ejecución. Los ladrillos se ponen ligeramente hacia atrás, inclinados los unos respecto a los otros. A medida que las bóvedas se hacen más planas, la coronación tendrá más tendencia a descender por el asentamiento del mortero, de modo que esto se tiene que tener en cuenta al determinar su altura.

En un espacio cubierto con cúpulas puede haber reverberaciones desagradables. Este fenómeno se puede limitar en cierta medida eligiendo material ligero y haciendo la superficie de la cúpula todo lo rugosa posible. Preferentemente se hacen cambios en el espesor de las juntas, usando ladrillos de tamaños distintos, y dejando la fábrica sin rejuntar.

Un excelente medio para evitar la reverberación es la colocación de casetones en la cúpula. Éstos disminuyen de tamaño hacia la coronación; se han encontrado diferentes métodos para hacer que esta disminución tenga lugar de manera regular (Lám. 19).

Los casetones no tienen, por cierto, que ser rectangulares a la vista; los antiguos romanos los hicieron a veces según trazados helicoidales.

Bóvedas en rincón de claustro

Aparentemente, la ejecución de bóvedas en rincón de claustro es muy sencilla si se toma la dirección de las hiladas de los paños paralelas a la base. Los planos de

junta están entonces perpendiculares a las líneas directrices. A esta forma de construir se la llama «ejecución en cuba». La bóveda claustral consta de varias bóvedas de cañón intersecadas entre sí. Durante la ejecución la bóveda tiene que estar soportada por una cimbra continua.

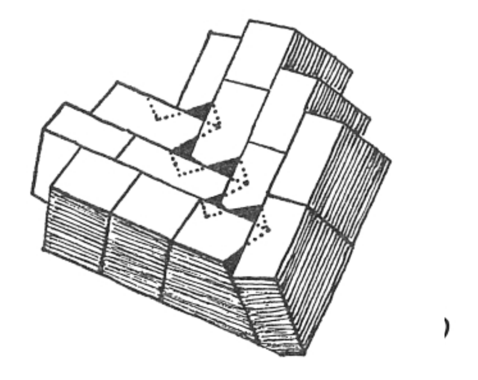


Figura 5. Encuentro de los paños de una bóveda en rincón de claustro

Si se considera una sección perpendicular a las aristas diagonales, entonces, si la bóveda se hace de ladrillo, resultará que se forma un pequeño hueco en forma de pirámide (Figura 5). Para evitarlo habría que cortar en el ladrillo una esquina interna, lo que tiene sus inconvenientes. Se tendrá que llenar por tanto el hueco con mortero de cal, o bien se tendrán que cocer ladrillos de formas especiales para las aristas; estos ladrillos tienen forma algo diferente en cada hilada. Si las aristas se ejecutan en piedra se supera este inconveniente, pues se labran las piedras con la forma adecuada. (Lám. 11, figs. 1^c–1e).

También se puede usar el aparejo en «cola de milano». En él se sitúan los planos de juntas de los ladrillos perpendiculares a los arcos diagonales, con lo que los ladrillos se encuentran entre sí trabados en diagonal en el centro de los paños de la bóveda. La arista se puede ejecutar entonces de forma relativamente sencilla, pues las caras de ladrillos se sitúan a ambos lados de los arcos diagonales sobre planos perpendiculares a dichos arcos; ahora, no es preciso

cortar las esquinas interiores de los ladrillos, dejándolos alternativamente el uno sobre el otro. No obstante, también se pueden emplear ladrillos especiales con una esquina cóncava, lo que es fácil de ejecutar y refuerza la arista (Lám. 11, figs. 2^a–2^d). La construcción se comienza entonces por los ángulos. Las hiladas se disponen inclinadas con respecto a la base, de forma que primero se hace una superficie en forma de cono. Estas bóvedas se pueden construir sin cimbra; esto requiere una alta cualificación por parte de los albañiles y este modo de construir es poco frecuente en los Países Bajos (Lám 9). Este aparejo se aplica principalmente cuando la sección de los paños de bóveda es semicircular o apuntada.

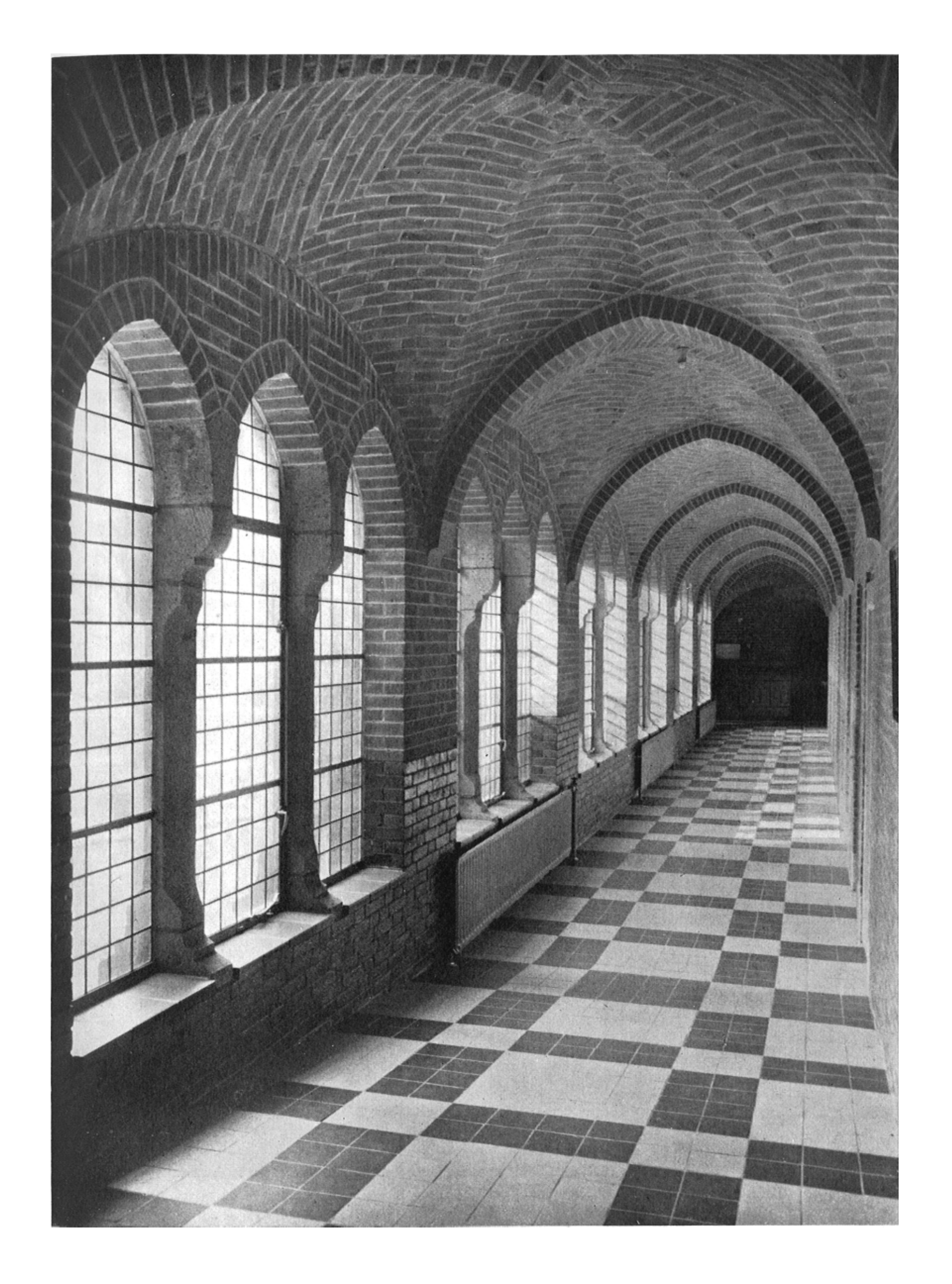
En bóvedas más rebajadas, el encuentro alternado de los ladrillos en el medio de los paños de las mismas ofrece tal número de posibilidades que se aceptan los inconvenientes que surgen al realizar las aristas con la mencionada ejecución en cuba (Lám. 11). No obstante, la mayoría de las bóvedas rebajadas se construyen de forma más fácil como cúpulas esféricas.

También se puede levantar una bóveda en rincón de claustro sobre una planta irregular. Se puede partir de la curvatura de uno de los paños de la bóveda y determinar por ella la curvatura de los otros paños y la de las aristas. Para ello se ha de tener en cuenta que las líneas de corte de los paños de la bóveda con planos paralelos a la base están todas a la misma altura respecto al plano de la base (Lám. 10, fig. 3). Como alternativa, se puede primero determinar la forma de los arcos de las aristas y después determinar la forma de los paños de la bóveda.

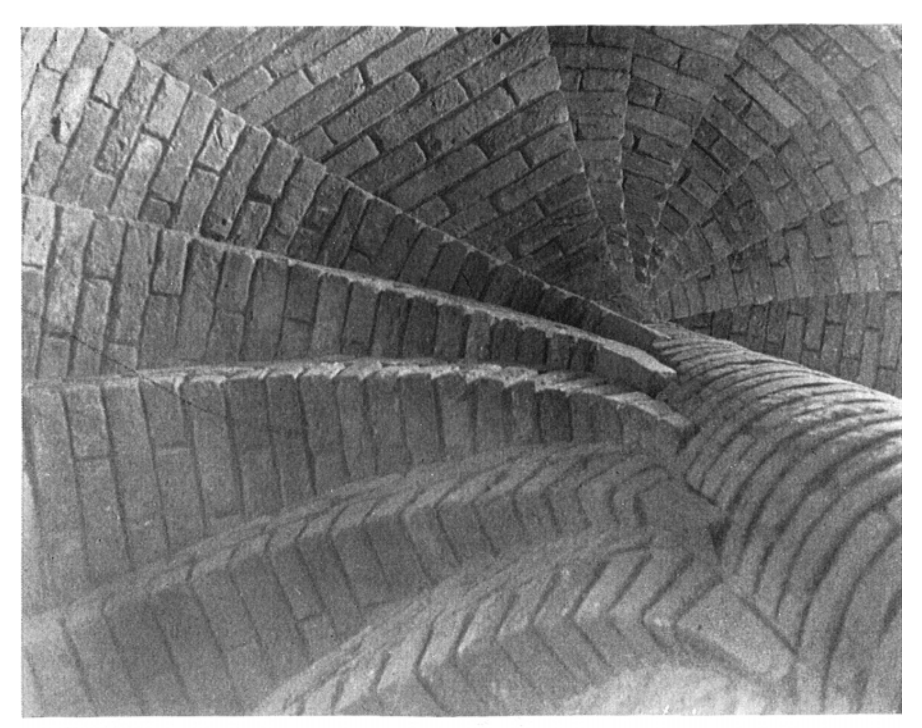
Las bóvedas esquifadas y en artesa son realmente bóvedas claustrales. Su construcción se puede deducir a partir de ellas.

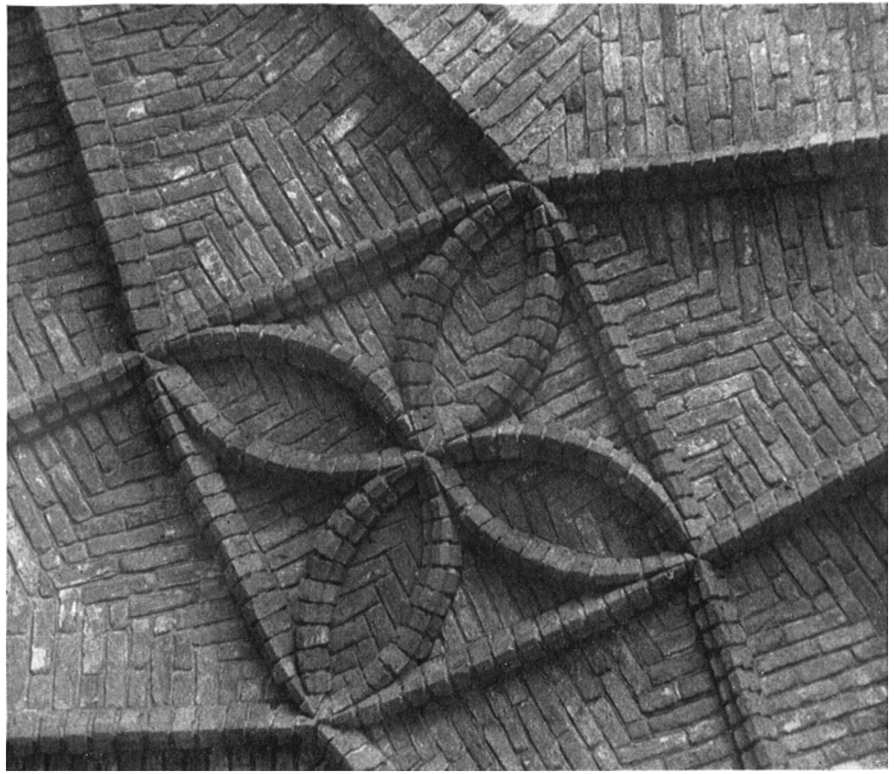
Bóvedas de arista y crucería simple

La ejecución de los paños de las bóvedas de arista se puede efectuar de forma análoga a las de en rincón de claustro, aunque se tiene una mayor libertad en las direcciones de los planos de las juntas. En el primer método, aparejo francés, las hiladas se disponen paralelas a las líneas de clave (Lám. 54, figs. 7, 11).



Galería norte del claustro de St. Elisabeth en Huissen. Arquitecto G. M. Leeuwenberg (foto Het Zuiden)





Arriba. Pilar central de escalera helicoidal de ladrillo en el Prinsenhof de Delft

Abajo. Ornamento decorativo en bóveda entrelazada del Prinsenhof de Delft

Restauración bajo la dirección del Prof. N. Lansdorp

Es difícil trabar bien los ladrillos en las aristas ya que en principio se alternan diagonalmente a derecha e izquierda. En proyección horizontal las juntas de las hiladas son líneas rectas. Los ladrillos que forman las aristas agudas tienen que ser adecuadamente troceados y recortados. A veces se deja una junta justamente sobre la arista, aunque es fácil comprender que entonces la trabazón es muy deficiente; mejor unión se obtiene cuando los ladrillos se dejan pasar alternativamente de uno a otro paño (Lám. 51, figs. 4-5). Cuando se utiliza piedra, se pueden emplear dovelas acodadas en la arista. En la construcción de bóvedas tardorománicas y góticas se evitaban estas dificultades colocando un nervio bajo la arista.

En el segundo método, aparejo inglés, los planos de juntas se disponen perpendiculares a los arcos diagonales (Lám. 54, figs. 8 y 12). La arista se puede ejecutar entonces con relativamente poco trabajo de corte, razón por la que es la manera preferente cuando se trata de una bóveda de arista, sin nervios (Lám. 52; Lám. 119, fig. 2). Además la arista se puede reforzar fácilmente por el trasdós (Lám. 53, figs. 5 y 7). Las piezas se traban en diagonal en las líneas de clave, y las líneas de juntas son líneas curvas en proyección horizontal.

En los métodos mencionados las aristas o los nervios se apoyan en una cimbra durante la ejecución, mientras que los paños o bien se realizan sin cimbra con ayuda de camones o bien se apoyan en una cimbra deslizante.

Se han aplicado más métodos en los que no se emplean cimbras, por ejemplo el romano, en el que se colocaba una cimbra deslizante, o el bizantino.

La forma de los arcos diagonales influye en la estabilidad de la bóveda; si son de forma circular u oval entonces la clave tiene tendencia a bajar, si son apuntados entonces la clave se moverá hacia arriba. En el primer caso las líneas de clave no se hacen horizontales la mayoría de las veces, al menos en los sentidos longitudinal y transversal, sino que se las da en una, o en ambas direcciones, una cierta inclinación, dotándoles de una cierta elevación o peralte.

Dicho peralte puede obtenerse por medio de un trazado recto o curvo de las líneas de clave. Si se aplica la elevación recta puede aparecer el defecto de que las aristas se quiebren hacia dentro en algún punto y se formen por tanto abolladuras. Por eso la elevación recta la mayoría de las veces no se hace mayor de una

vigésima quinta parte de la luz, o bien se realiza en forma curva. La tendencia a levantarse se contrarresta colocando una pesada clave.

Bóvedas de crucería con múltiples nervios

Las bóvedas nervadas se construyen sobre cimbras de carpintería de cuidada ejecución; sobre todo los nervios tienen que estar apoyados durante la ejecución, tanto de ellos mismos como de la plementería (Lám. 74, fig. 12). (Ver también el apartado 4.5, La construcción abovedada en la Edad Media, más adelante).

Si son de piedra, se tienen que situar primero las claves, mediante plomadas, en su posición precisa. Se las deja descansar sobre los extremos superiores de los arcos de camones que constituyen la cimbra. Se ha de prestar atención a que las nervaduras se sitúen justo a la mitad de los camones de apoyo, lo que se puede controlar mediante plomadas, y se toman medidas para que las dovelas no puedan volcarse.

Las dovelas de los nervios tienen una longitud de 0,50 a 1 metro y se reciben con mortero de cemento o de yeso; también se pueden colocar láminas de plomo entremedias. A veces se unen mediante clavijas, preferiblemente de cobre o de hierro inoxidable. Las clavijas son de aproximadamente 9 centímetros de largo y 2-3 centímetros cuadrados de sección; se pueden usar muy adecuadamente tubos de cobre. Se fijan en la pieza de más arriba y tras meterse en la caja de la situada más abajo se acercan arrastrándose. En la clave se tiene que hacer un truco; la clavija, que se coloca suelta en una caja de la clave, se ata con un trozo de cuerda. Después de la colocación se le da un tironcito a la clavija, que ha sido temporalmente metida en el agujero previamente perforado, hasta que vaya a entrar en la caja de la piedra adyacente.

Los nervios de ladrillo se pueden hacer con antelación, aunque la mayoría de las veces se construyen a la vez que la plementería. En la ejecución se debe hacer todo lo posible por trabajar a la vez por los dos lados. Las plementerías pueden realizarse tanto con cimbras móviles como sin ellas (Lám. 53, fig. 8). En bóvedas de gran luz, con frecuencia no será posible ni ejecutar todos los nervios de una vez ni colocar todas las cimbras y después hacer la plementería. Si así fuera, los andamios deberían elevarse a la altura total todos a la vez, constituyendo un estorbo para los trabajos de albañilería.

En la bóveda se trabaja, entonces, por partes. Primero se colocan los arcos de camones de sujeción de los nervios hasta una altura igual a la parte superior del relleno, ejecutando la primera parte de los nervios junto a los plementos y el relleno. En esta fase, hay que prestar atención a la unión con la fábrica, enjarjando en las rozas previamente preparadas.

Después se continúa con el asiento de la fábrica de nervios y plementos, hasta la altura de un puntal de apoyo (aproximadamente 1,60 m), aunque en la última parte, a la altura de cuatro o cinco puntales, se ponen a la vez todas las cimbras de las nervaduras y se ejecuta todo el sistema de nervios, tras lo cual se continúa con la plementería. Los nervios, largos y esbeltos, tienen que arriostrare temporalmente mediante puntales.

Tal como se ha dicho, se debe tener cuidado de que la clave no pueda elevarse. Existe peligro de ello sobre todo si aún no se ha colocado la plementería. No es aconsejable apuntalar contra la armadura de cubierta, ya que se pueden ocasionar vibraciones y empujes indeseados por el viento, que pueden producir asientos que reduzcan la solidez; es mejor cargar la coronación, por ejemplo, mediante la colocación de una pesada clave. (Sobre la ejecución de bóvedas de nervaduras múltiples, en estrella o reticuladas ver además la página 186 y ss.).

Lunetos

A veces se combina una bóveda principal con otras más pequeñas que la cortan, tanto para reforzar el sistema del abovedado como para permitir la entrada de luz o cualquier otra apertura. Estas bóvedas pequeñas reciben el nombre de lunetos.

La forma de los lunetos puede ser: un cilindro completo o un semicilindro, un cono, una esfera, o una cuña de Wallis. Los lunetos en forma de cúpula pueden ser una solución para la apertura de huecos de iluminación, por ejemplo en bóvedas de sótanos en donde no se dispone de mucha altura.

En el dibujo de las secciones se debe tener en cuenta que las líneas de intersección no siempre se pueden determinar fácilmente por proyecciones. Si se corta una bóveda de cañón elíptica con una semicircular entonces la intersección no es en general una elipse y no se puede determinar mediante construcciones sencillas, posibles en el caso de elipse, sino que se tiene que

obtener punto a punto (al menos cuando las líneas de clave son de altura diferente).

El arco de encuentro: El encuentro de la bóveda con el luneto sufre empujes tanto de la bóveda principal como del luneto. Las aristas o nervios surgidos por la intersección, se podrían comparar con las aristas o nervios de una porción de bóveda de crucería (Lám. 20).

Por lo general estas aristas o nervios no estarán contenidos sobre un plano, siendo la carga sobre ellos muy asimétrica y desigual. Esta presión desigual podría producir su fractura. Aunque es verdad que esta posible fractura se ve impedida por las plementerías adyacentes, hay sin embargo todo tipo de razones para poner un cuidado muy especial en su construcción. Es a veces razonable trazar un arco especial, el arco de encuentro, en la línea de intersección de la bóveda con el luneto, con lo que hay que determinar, tanto por consideraciones constructivas como estéticas (sobre todo en piedra), la forma de sus elementos. A la línea del trasdós de este arco se le da a menudo una forma tal que puede fácilmente aparejarse con la fábrica de la bóveda principal (Lám. 85, fig. 1; Lám. 87, fig. 3). Se deben evitar los ángulos agudos en este arco, especialmente en su parte inferior; en caso contrario, las dovelas tienen que cortarse lo que sólo es posible si se usa un material relativamente blando (Lám. 20, fig. 1).

Si se tienen que realizar muchos lunetos iguales se puede considerar la conveniencia de cocer ladrillos especiales para las aristas.

Para determinar las proyecciones de las líneas de intersección y posteriormente la posición de los planos de junta del arco de encuentro (necesario en la construcción en piedra) se remite a los ejemplos dados en las Láms. 5, 13, 14 y 20 y a los manuales de geometría descriptiva.

Puesto que el arco de encuentro no está situado sobre un plano, es decir, tiene una forma relativamente alabeada, cuando se ejecuta en piedra el cantero debe tallar las transiciones gradualmente, y si se hace de ladrillo el albañil debe compensar, es decir, debe cortar y adaptar los ladrillos y colocarlos un poco contrapuestos y contrapeados.

LÁMINA 20. CONSTRUCCIÓN DE LUNETOS

R
A''
B''
C''
I''
H''
J'
K'
L'
M'
R R

1ª Vista superior del luneto.

ángulo agudo

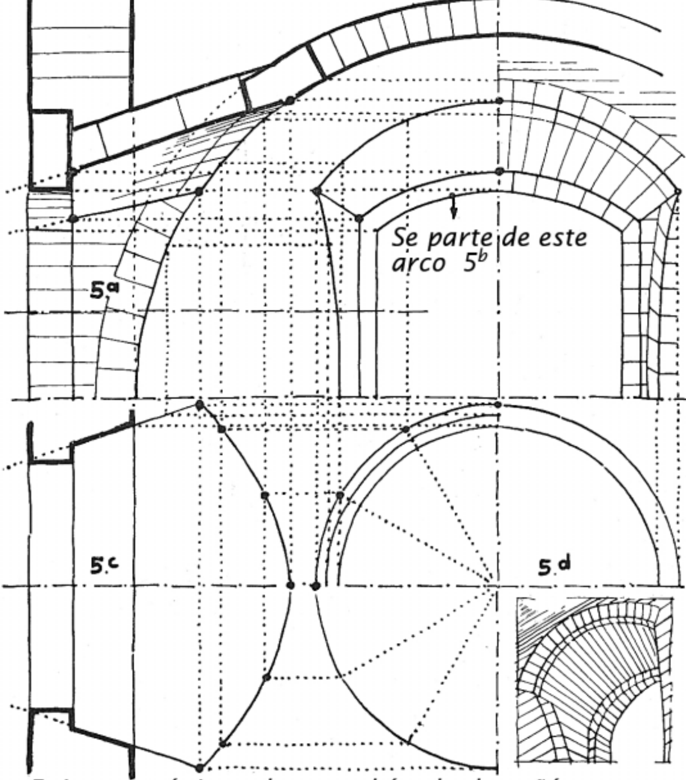
2. Unión deficiente del luneto

3. Unión mejorada del luneto

4. Buena unión del luneto. Las hiladas de la bóveda de cañón son aquí paralelas al eje de la bóveda.

1. Luneto cilíndrico sobre una bóveda de cañón semicilíndrica. Las hiladas de la bóveda de cañón son aquí perpendiculares al eje de la bóveda.

1. Construcción del luneto.
El arco escarzado con radio R sobre la ventana es el punto de partida para el luneto. A''B''C'' es su proyección vertical. A continuación se proyecta el arco de encuentro H''I''J''K''L''M'' contra el que apoyan el luneto y la bóveda de cañón. Este arco de encuentro se hace preferentemente con piezas sin ángulos agudos. Ya que los ladrillos se cortan in situ y a veces se tienen que limar se elige un material relativamente blando.



5. Luneto cónico sobre una bóveda de cañón semicilíndrica.

5. Construcción del luneto.
5^a. Sección vertical de luneto y la bóveda de cañón.
5^b. Alzado del luneto.
5^c. Intersección de luneto y bóveda de cañón en proyección horizontal.
5^d. Proyección vertical del cono del cual forma parte el luneto. En la figura complementaria se explica como se determinan los diferentes puntos.

Los muros laterales: En los dibujos de un luneto se tiene que considerar desde el principio como será la ejecución. El luneto, tenga o no arco de encuentro, puede realizarse a la vez que los muros de apoyo, esto es, unido a ellos, de manera que la bóveda principal se apoye después. La construcción de la bóveda principal no tiene por tanto influencia sobre la bóveda menor del luneto, ya que esta última solo debe servir de arranque (Lám. 20, fig. 5).

Si se prefiere sin embargo ejecutar las dos bóvedas a la vez, entonces ambas se apoyan en los muros verticales. A veces se preparará un cajeado para la bóveda de perforación; a menudo esto se hace también con una junta corrida situada en el muro (Lám. 20, fig. 1).

Los laterales del luneto tienen que auxiliarse mediante rellenos contra el empuje de la bóveda. En estos laterales –en bóvedas acopladas o adosadas los intermedios son verdaderos muros de pequeño tamaño– se pueden a su vez abrir huecos redondos o de cualquier otra forma.

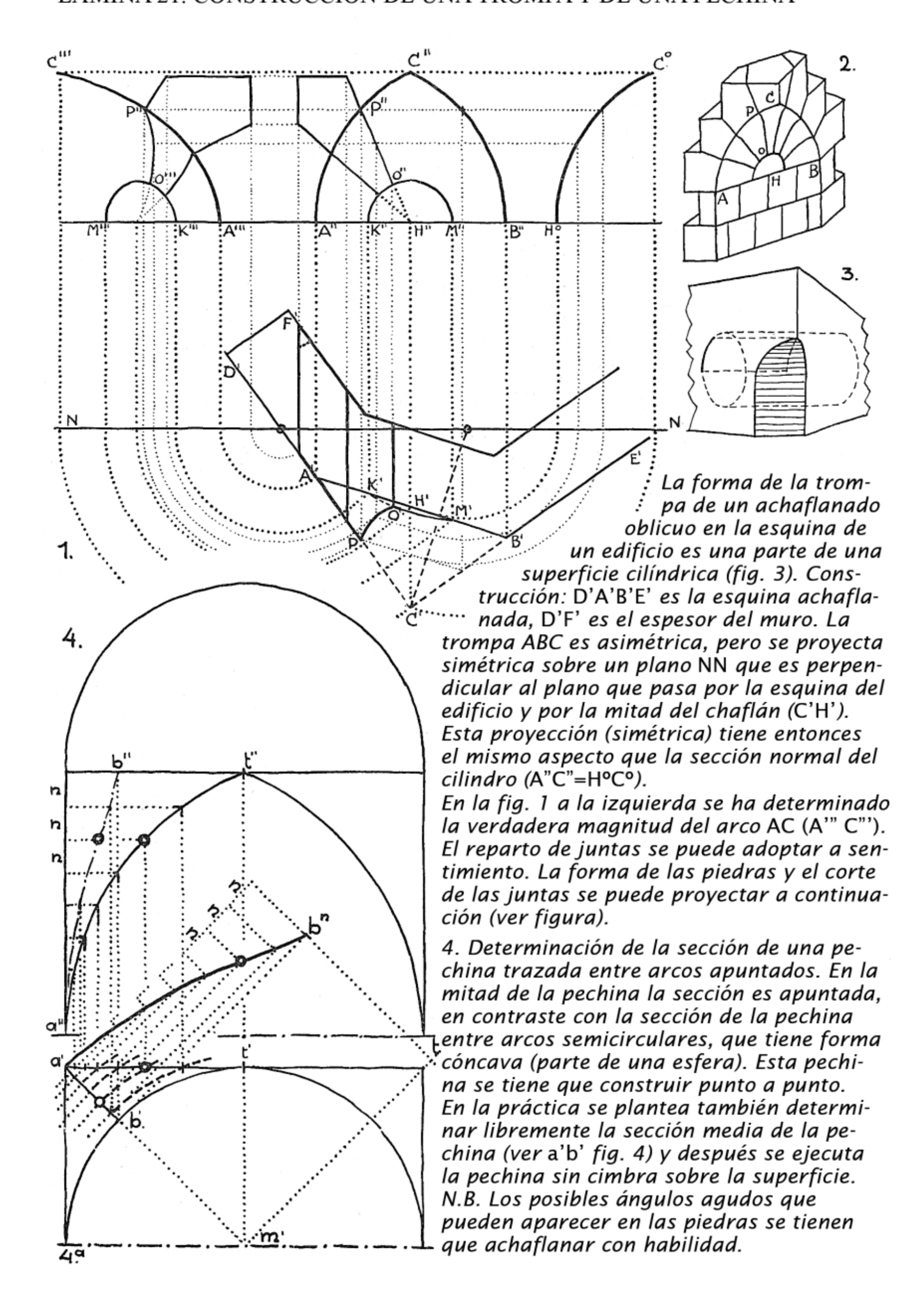
Un luneto tiene que, sobre todo, rellenarse suficientemente en los arranques; dado que el empuje causado por la bóveda principal puede ser considerable y la bóveda de perforación está a menudo bastante sobrecargada, es aconsejable hacer sólidas las jambas o muros de apoyos laterales, o sea preferiblemente más gruesos que la bóveda, tanto más cuanto la bóveda menor colabora a la firmeza de la principal. En la ejecución de los lunetos se hace uso generalmente de sólidas cimbras sobre las que se clavan tablas. Estas cimbras se montan en el lugar deseado sobre cuñas y se unen a la cimbra de la bóveda principal, pero la mayoría de las veces pueden llegar a estar sueltas e independientes de ella.

Formas de transición: trompas y pechinas

Las formas de transición y voladizos que, entre otras cosas, sirven para hacer posible la unión de bóvedas y muros verticales, tienen que ser determinadas a menudo punto a punto. En cualquier caso es aconsejable, como control, localizar algunos puntos individualmente por las proyecciones dadas, ya que, a veces, la forma de transición es completamente diferente a lo supuesto a partir de su consideración plana.

Una pechina trazada junto a arcos o bóvedas apuntados no forma una oquedad sino que tiene una sección ojival, tal como directamente resulta si se dibujan

LÁMINA 21. CONSTRUCCIÓN DE UNA TROMPA Y DE UNA PECHINA



La forma de la trompa de un achaflanado oblicuo en la esquina de un edificio es una parte de una superficie cilíndrica (fig. 3). Construcción: D'A'B'E' *es la esquina achaflanada,* D'F' *es el espesor del muro. La trompa ABC es asimétrica, pero se proyecta simétrica sobre un plano* NN *que es perpendicular al plano que pasa por la esquina del edificio y por la mitad del chaflán* (C'H'*). Esta proyección (simétrica) tiene entonces el mismo aspecto que la sección normal del cilindro* (A"C"=H°C°*).*

En la fig. 1 a la izquierda se ha determinado la verdadera magnitud del arco AC (A''' C'')*. El reparto de juntas se puede adoptar a sentimiento. La forma de las piedras y el corte de las juntas se puede proyectar a continuación (ver figura).*

4. Determinación de la sección de una pechina trazada entre arcos apuntados. En la mitad de la pechina la sección es apuntada, en contraste con la sección de la pechina entre arcos semicirculares, que tiene forma cóncava (parte de una esfera). Esta pechina se tiene que construir punto a punto. En la práctica se plantea también determinar libremente la sección media de la pechina (ver a'b' *fig. 4) y después se ejecuta la pechina sin cimbra sobre la superficie. N.B. Los posibles ángulos agudos que pueden aparecer en las piedras se tienen que achaflanar con habilidad.*

las proyecciones (Lám. 21, fig. 4; Lám. 33, fig. 4ª; Lám. 44, fig. 5ª). La pechina no es, por tanto, una parte de una esfera tal como es el caso frecuentemente en otras pechinas situadas entre arcos semicilíndricos.

Cuando la pechina se ejecuta con una inclinación equivocada, ésta pasa factura en el aspecto exterior de la bóveda. Los trabajos de perfilado y las decoraciones situadas cercanas al encuentro entre bóveda y pechina aparecen desfigurados, lo que es visible en iglesias con cúpula recientes en las que no se han tenido en cuenta estos sencillos aspectos geométricos. La fantasía de los diseñadores tiene un amplio campo en la realización de estas formas de transición, que se pueden realizar de innumerables maneras, tal como se verá más adelante al tratar de la construcción de bóvedas bizantinas, persas, turcas o hindúes, donde se profundizará en este tipo de formas.

A menudo la mejor solución para el diseño de formas de transición se obtiene dejándose aconsejar por el sentido común y por el tratamiento de la semejanza. Así, para el dibujo de una trompa como solución de esquina sobre un muro achaflanado no simétrico se buscará una posición en la que la trompa se vea simétrica. Se parte de esta vista simétrica y se determinan a partir de ella, por proyecciones, los contornos, cortes de piedras, planos de juntas, etc. (Lám. 21, figs. 1, 2).

Ya que la verdadera magnitud no siempre se deduce claramente del dibujo, puede ser aconsejable hacer un modelo con antelación, por ejemplo con arcilla.

Las anteriores consideraciones sobre lunetos son en parte también aplicables a estas formas de transición.

3
Estética

La bóveda tiene una influencia determinante a la hora de cubrir un espacio, de forma que sus proporciones sean adecuadas y las subdivisiones rítmicas y armónicas. Estas proporciones se adquieren proyectando las dimensiones de longitud, el ancho y la altura en mutua relación. Por ejemplo, los constructores de bóvedas persas trabajaban, según Dieulafoy, según un sistema determinado en el que las medidas de las diferentes partes eran dependientes de la altura del espacio; había una sencilla relación entre las medidas de longitud, ancho y alto, partiendo de un triángulo cuyos lados están en relación 3:4:5 (Lám. 28, fig. 6).

En el gótico podemos reencontrar también este tipo de relaciones; así en el alto gótico el triángulo equilátero es la unidad de medida para el interior y las partes. Los maestros del Renacimiento partieron también de proporciones establecidas que daban una gran unidad a los espacios interiores (Lám. 102, fig. 5). Con frecuencia, se realizaron correcciones ópticas, modificando más o menos la altura de las bóvedas. Debe haber también relación entre bóveda y muros; el ritmo de la división de los muros tiene que reflejarse en la bóveda.

Estas relaciones armónicas no se pueden determinar exclusivamente sobre el dibujo ya que en él se ven proyecciones mientras que en la realidad las bóvedas se contemplan desde el suelo, en perspectiva. Es muy posible que una proyección horizontal o vertical sea correcta pero que una vez construida parezca discurrir

torcida. Por eso también aquí son necesarios la experiencia y el criterio; además, hacer una maqueta es en extremo aconsejable.

La mayoría de las veces se busca una división bella y tranquila de los paños de la bóveda y de los nervios adyacentes. El trazado de las líneas de los nervios tiene también que comprobarse cuidadosamente. Si, por ejemplo, la línea de clave de las bóvedas presenta inclinaciones, esto puede dar lugar a que se obtenga una impresión desagradable. Por ello, la mayoría de las veces, los constructores medievales ingleses hacían una línea de clave recta en las bóvedas de sus iglesias, marcándose muy decididamente la dirección principal (Lám. 63, fig. 6).

También se debe de prestar atención al material con el que se construyen las bóvedas. Si hay demasiada diferencia en formato o en color entre el material de las bóvedas y el de los muros y pilares, se puede perder la unidad y con ello la armonía. Por otro lado el encanto que posee un espacio abovedado puede aumentar por un cambio bien elegido. La entrada de luz también puede ser de gran interés.

La técnica del abovedado está ligada al trabajo manual; esto conlleva pequeñas desviaciones de la forma, variaciones, que pueden ser reforzadas intercambiando piezas pequeñas y grandes que pueden dotarlas de efectos estéticos. La forma y la dirección de las juntas ponen en manos del constructor de bóvedas un medio para lograr estos efectos. Los arquitectos de bóvedas persas muestran en todas partes tal número de hallazgos que uno no sabe qué admirar más, si la maestría con que el albañil supo crear las formas o las variaciones en la posición de los ladrillos, si la alternancia en la aplicación de ladrillos vidriados y normales o el gusto con el que están solucionados todos los posibles encuentros complicados y vuelos (Lám. 38).

4
Historia de la construcción abovedada

Introducción

La construcción de bóvedas en el antiguo Egipto y en Asia Menor

En Asia Menor y Egipto la construcción abovedada se practicaba ya miles de años antes de Cristo; sobre todo en el país del Tigris y el Eúfrates este arte se desarrolló ya a gran altura cuando la construcción de bóvedas en Occidente, en Italia y los países limítrofes estaba aún balbuciente.

Por los métodos seguidos, que fueron distintos en Oriente y Occidente, se puede percibir que en la construcción de bóvedas los diferentes pueblos aspiraron a un cierta economía, que dependía de múltiples factores como la riqueza o escasez de madera, la presencia o no en el suelo de sustratos de arcilla o de piedra, la disponibilidad o no de trabajadores cualificados, las circunstancias bajo las que los materiales tenían que ser traídos, etc.

En Oriente, donde la madera es en general escasa, las bóvedas se hicieron reduciendo al mínimo el uso de cimbras; el sistema de abovedados sin cimbra se desarrolló allí de forma notable.

La construcción abovedada romana

La construcción de bóvedas fue aplicada a gran escala por los romanos, sobre todo en Europa occidental. Tuvieron a disposición muchos medios materiales auxiliares, tenían madera y otros materiales en abundancia, y pudieron poner a trabajar a gran número prisioneros de guerra, esclavos e incluso habitantes de las áreas conquistadas. Pero, en cambio, la mano de obra experta escaseaba, y tuvieron que contar con ello en la construcción de sus bóvedas. Entre otras, emplearon la bóveda de cañón, la de arista y la cúpula. La fábrica de estas bóvedas estaba compuesta por arcos de delgados ladrillos dispuestos a intervalos regulares, embebidos en un relleno de piedras pequeñas y mortero, el hormigón romano. Este trabajo podía realizarse por trabajadores completamente inexpertos. Las bóvedas romanas eran pesadas; contenían gran cantidad de material y en su ejecución tenían que trabajar muchas manos.

La construcción abovedada bizantina

En Grecia y Asia Menor se unieron los métodos de los romanos con los de las tradiciones orientales; los ingeniosos griegos supieron mejorarlas y combinarlas en un sistema de construcción propio, bien meditado y genialmente trabado.

En el inteligente pueblo griego no hubo carestía de buenos operarios, pero sí se tuvo que ahorrar en materiales, sobre todo en madera, en contraste con los romanos que la usaron en grandes cantidades para cimbrar sus pesadas bóvedas durante la construcción.

Los bizantinos crearon una nueva forma de bóveda que reunió las ventajas de la cúpula y la bóveda de arista en muchos aspectos: se podía ejecutar sin apoyos inferiores, es decir, sin cimbra; tenía gran resistencia ya que los ladrillos se encajaban unos con otros y se mantenían en equilibrio; y se podían hacer fácilmente huecos de iluminación bajo los arcos de cabeza.

Mediante la aplicación de la pechina supieron facilitar el tendido de cúpulas sobre planta cuadrada, pero también hicieron bóvedas vaídas. A veces las cúpulas se ejecutaron como bóvedas de paños, dividiéndose mediante nervios en un número de partes iguales. Con este último tipo, del que Santa Sofía de Constanti-

nopla es un excelente ejemplo, se abrió un nuevo camino, diferente al seguido por los romanos. Se llegó a una separación en las funciones de las partes constituyentes. Los nervios, que ya no estaban embebidos en la masa del material de la bóveda como en las bóvedas romanas, actuaban por sí mismos, y alcanzaron tal resistencia y estuvieron tan bien contrarrestados, que no solo reforzaron los paños de la bóveda, sino que actuaron como sus auténticos soportes. En la construcción abovedada gótica esta separación entre partes portantes y soportadas se pondrá en práctica de forma aún más intensa.

Para el contrarresto de grandes bóvedas, por ejemplo de cúpulas sobre espacios centrales de iglesias, se concibió un ingenioso sistema por el que se neutralizaba el empuje lateral, que tan catastrófico puede ser en la construcción abovedada.

En contraste con las pesadas bóvedas romanas, las bizantinas eran considerablemente delgadas, por lo que el peso era menor y se podía reducir la gruesa masa del muro que los romanos necesitaban para reforzar la estabilidad de sus construcciones.

No se tuvo aquí miedo a usar materiales muy ligeros, tales como vasijas o incluso tubos embutidos unos con otros y arqueados, que ascendían en espiral y con los que supieron hacer cúpulas estables como, por ejemplo, las del Baptisterio de San Vital en Rávena.

La construcción abovedada persa, turca e islámica

El arte del abovedado bizantino se continuó desarrollando en Asia Menor. Los persas, turcos y árabes lo tomaron como base, combinando la técnica bizantina con las tradiciones transmitidas de su propio entorno. Sin embargo, a ello se añadieron aún nuevos hallazgos. Los persas fueron los constructores de bóvedas por excelencia; mostraron una comprensión de sus problemas de estabilidad fuera de lo común y supieron manejar magistralmente el material a su disposición, principalmente el ladrillo.

Uno de sus hallazgos, con el que enriquecieron la técnica del abovedado, consistió en dar a las bóvedas una cierta forma peraltada, óptima desde el punto de vista estático. Un ejemplo de esto es la llamada «bóveda sasánida», perteneciente a las ruinas del palacio de Ctesifonte, una ciudad situada en el Tigris a unos 45 km al

sureste de Bagdad. En esta bóveda de 22 m de luz el trazado es el mismo que el de una catenaria, el arco más económico y de mejor forma para una bóveda de cañón. En la actualidad nuestros constructores de hormigón eligen este arco para sus ajustadas construcciones de puentes. Un segundo hallazgo consistió en hacer bóvedas de doble casco, con lo que se obtuvo un mayor ahorro de material, en comparación con las de una sola rosca, manteniendo la rigidez y solidez. Desarrollaron también diferentes motivos de transición, principalmente pequeñas bóvedas en forma de trompas, mediante las cuales se podía hacer de manera sencilla una base poligonal o circular para el arranque de las cúpulas.

Los hallazgos de los turcos y árabes están más bien en el campo decorativo; tienen que ver principalmente con las formas de transición que por su forma y construcción se prestan a la colocación de ornamentaciones geométricas y efectos decorativos. Estas formas de transición como el triángulo turco y los mocárabes han llegado a ser una marca de su estilo.

La construcción abovedada hindú

Los constructores de bóvedas hindúes tuvieron que poner sus grandes dotes técnicas al servicio de dominadores extranjeros, pero a pesar de ello enriquecieron la técnica del abovedado con un hallazgo constructivo de primer orden, dando una solución satisfactoria al problema de cómo hacer una base fija e indeformable para una gran cúpula a mucha altura sobre el suelo. Estéticamente, supieron dar de forma completamente justificada un lugar dominante a la cúpula en los conjuntos construidos; también usaron este efecto en la arquitectura de los jardines.

La arquitectura de los pueblos orientales quedaría fuera de consideración si se excluyera la construcción de bóvedas. Dicha construcción juega un papel, no solo en la erección de edificios monumentales, sino también en la de viviendas sencillas y edificios utilitarios. Las técnicas de abovedamiento forman la parte más destacada del conocimiento técnico de sus operarios.

La construcción abovedada medieval

En el oeste de Europa se asumió desde los primeros siglos de la Edad Media el legado de los romanos, tanto las formas típicas y los métodos constructivos ro-

manos occidentales como los de los bizantinos. En Italia, monumentos como San Marcos muestran claramente su procedencia bizantina; en los monumentos franceses, como las iglesias abaciales de Fontevrault y Saint Front, la cosa es menos clara, mientras que la sala del Emperador en la iglesia de S. Servando en Maastricht, cubierta con una cúpula, suscita igualmente recuerdos de ejemplos a la bizantina y a la romana.

No se conformaron sin embargo con aplicar sin más el conocimiento transmitido; abrieron en seguida caminos propios y se plantearon nuevos problemas cuya solución hubo de encontrarse. Estos problemas correspondieron tanto al ámbito técnico como al formal. Se tuvieron que tener en consideración los materiales disponibles y el escaso conocimiento técnico del que disponían los operarios situados en áreas alejadas de Roma.

Si se contempla la historia de la arquitectura medieval, entonces parece que el gran problema de los constructores consistió en lo siguiente: en el abovedado de la nave de la iglesia, con lo que ésta se cubría sin peligro de incendio, y en conseguir una digna iluminación de la nave. El deseo de abovedar se llevó tanto a la nave principal como a las laterales. Al principio los constructores se pusieron a trabajar de forma vacilante, a la vista de los métodos elegidos; mejoraron progresivamente su técnica, que con el paso del tiempo devino en un sistema muy bien estudiado. En la primera arquitectura medieval se aplicaron las formas abovedadas de los romanos, esto es, la bóveda de cañón, la de arista y la cúpula. Pronto la bóveda de arista cedió su lugar a otras formas de bóveda, en especial a la de arista peraltada, más económica. La planta de la nave central se dividió en tramos cuadrados de ancho doble que los de las naves laterales, abovedándose todos estos tramos cuadrados.

Se dio a las columnas que recibían las diagonales de los cuadrados más grandes una sección mayor, con lo cual podían recibir una carga mayor que las columnas situadas entre ellas. Este sistema alternante fue también costumbre en el primer gótico.

Rápidamente se llegó a la idea de cargar algo más las columnas intermedias, con lo que para cada tramo cuadrado mayor se tendió un nervio perpendicular a la dirección longitudinal de la nave en el medio de la bóveda; sobre este nervio se dejó descansar una parte del peso de la bóveda dividiendo ésta en seis partes,

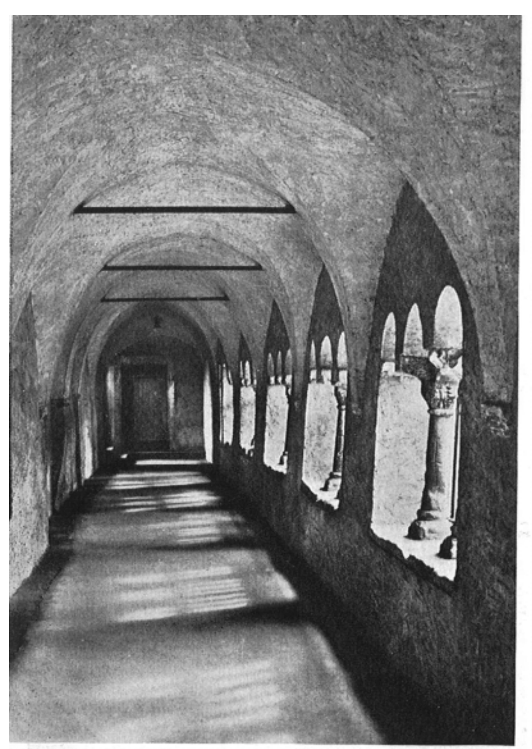
de manera que las columnas intermedias también recibieran parte del peso. Sin embargo esta manera de abovedar satisfizo a los constructores medievales solo en parte. Buscaban un medio de cargar todas las columnas de forma completa y por igual, y encontraron el método adecuado haciendo alargadas las bóvedas sobre el vano central, de forma que su ancho fuera igual al de las bóvedas pequeñas de las naves laterales.

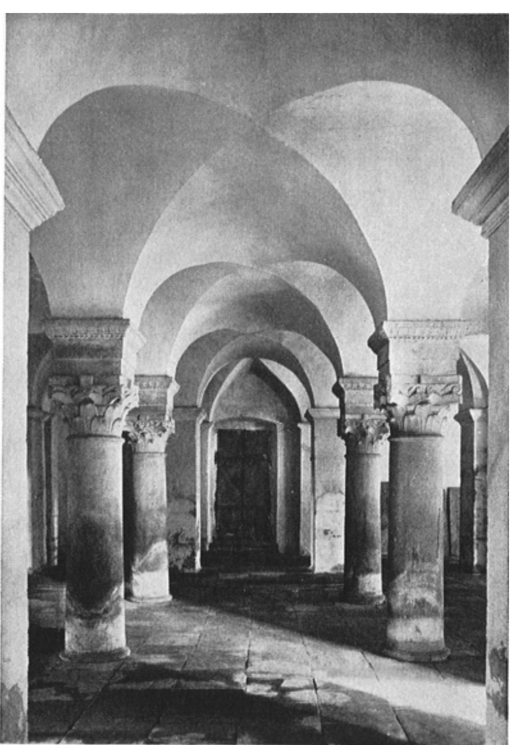
La nave central se levantó y abovedó entonces a mucha más altura que las laterales, quedando una gran superficie plana entre ambos abovedados, donde se abrieron huecos de iluminación. Resurgió el tipo basilical, con el que se construyeron la mayor parte de las iglesias góticas. El empuje ejercido por las bóvedas fue conducido hacia puntos de apoyo situados entre las ventanas. El empuje lateral se absorbió ahora por contrafuertes y pesados arcos que hicieron de contrarresto.

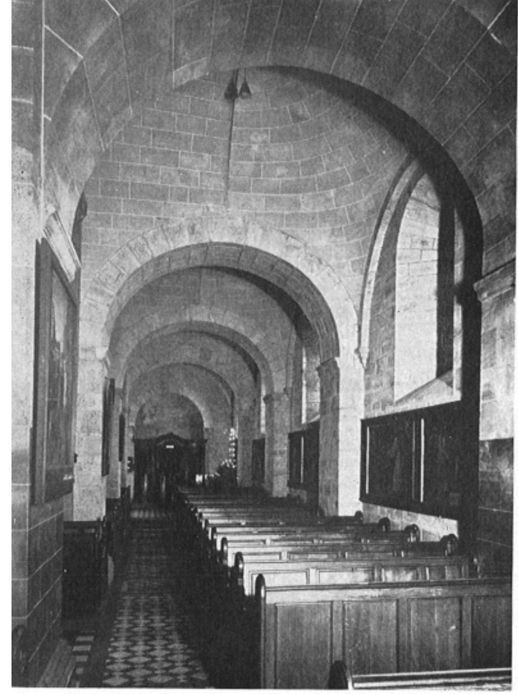
Con esta conjunción de elementos se obtuvo un ingenioso, aunque también algo complicado, sistema mediante el cual todas las dificultades técnicas posteriores encontraron solución.

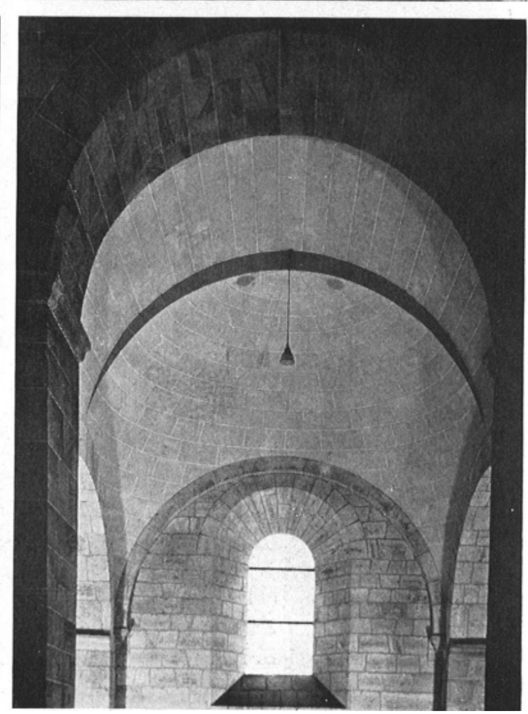
Una dificultad añadida surgió con el siguiente problema: cómo ofrecer suficiente rigidez con los muros de la iglesia. En la época románica las naves laterales estaban formadas por pisos que discurrían como galerías a lo largo de la nave principal. Por ello, y para poder ofrecer resistencia a los importantes esfuerzos del viento, los muros de la iglesia se hicieron adecuadamente robustos.

Pero estos métodos no fueron satisfactorios para los altos edificios religiosos del Gótico. En ellos se situaron altos y pesados machones de piedra a cierta distancia de la iglesia y se tendieron desde allí uno, dos y a veces hasta tres arbotantes hasta la posición donde estribaban los arcos diagonales y transversos. La trabazón de la iglesia en sentido transversal fue asumida solo en parte por la armadura de cubierta con sus vigas de atado y sus puntales. También las bóvedas góticas contribuyeron a ello en parte. Éstas fueron ligeras, comparadas con las pesadas construcciones románicas; los paños de las bóvedas se separaron los unos de los otros por nervaduras y dichas nervaduras fueron consideradas como los verdaderos soportes. La separación de partes portantes y soportadas fue asumida en el Gótico con todas sus consecuencias. No se quie-





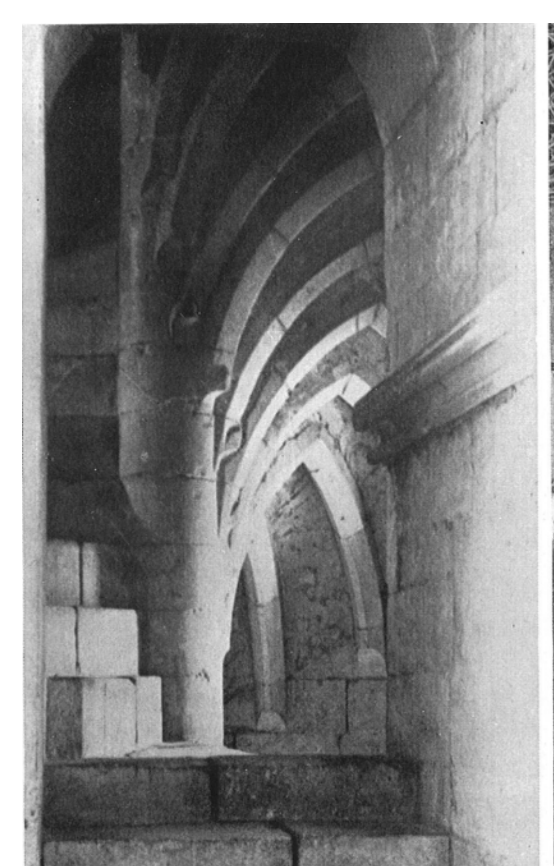


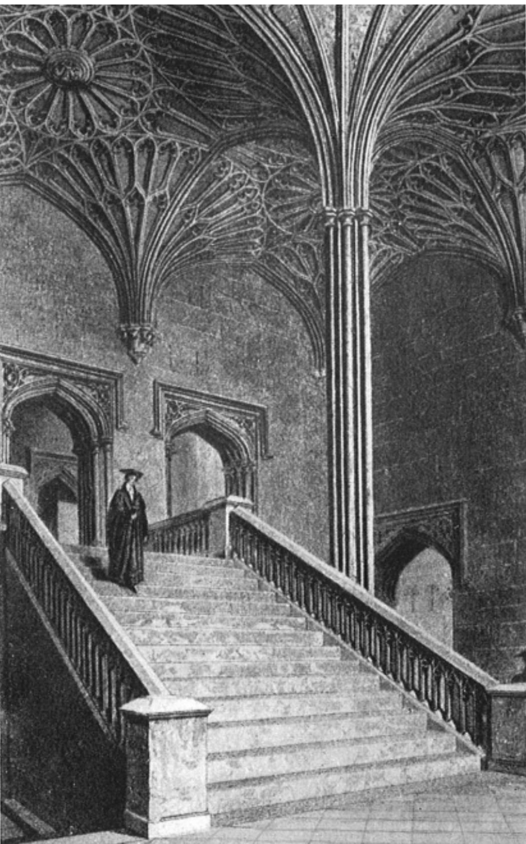


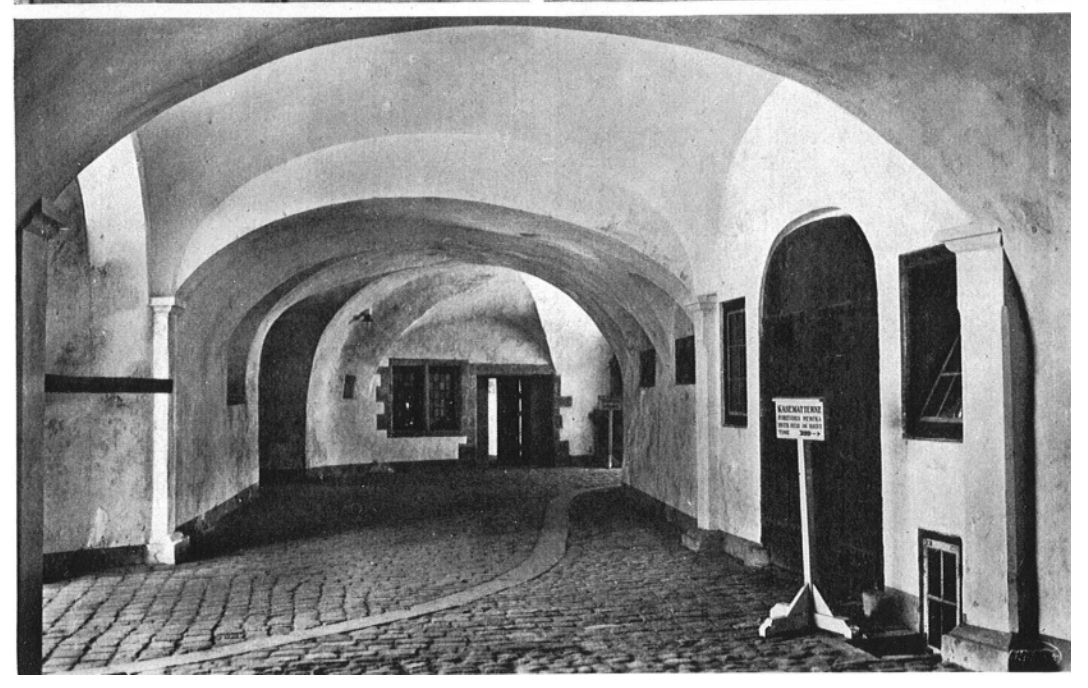
Arriba izquierda. Galería del claustro en la iglesia de Busdorf en Paderborn (siglo XII)

Arriba derecha. Pasillo con bóvedas de arista en la antigua iglesia benedictina de Corvey an der Weser (875-885)

Debajo. Vistas de las bóvedas de las naves laterales de la Iglesia de San Pancracio en Heerlen. Restaurada bajo la dirección de F. Peutz







Arriba izquierda. Bóveda helicoidal gótica en piedra

Arriba derecha. Bóveda de abanico sobre una escalera (Oxford)

Debajo. Galería cubierta con bóvedas bohemias y de cañón (Kronborg)

re decir con ello, como pensaron muchos historiadores del arte de nuestro reciente pasado, que tal separación sea absoluta, que, por ejemplo, los nervios solo cumplen una función activa y que la plementería solo añade su peso pasivamente al de los nervios. Por el contrario, las fuerzas en las bóvedas se repartirán tanto por los nervios como por las plementerías próximas, de manera que todas las partes de la bóveda colaboran activamente para vencer la fuerza de la gravedad.

La trabazón de la iglesia en sentido transversal, que permite la transmisión de las fuerzas ejercidas por el viento sobre los muros al lado opuesto, se reforzó debido a que la parte superior de la plementería se tendía bastante plana; la coronación formaba en las direcciones longitudinal y transversal de la iglesia, como si dijéramos, una compacta serie de piedras planas por las que se absorbían las fuerzas horizontales, obteniéndose un elemento esencial de rigidez contra las fuerzas del viento.

Cuanto más baja es la iglesia más efectiva puede resultar esta unión, sobre todo si las bóvedas presentan líneas de clave sensiblemente planas. En la construcción de iglesias del gótico inglés se hizo uso de esta sencilla y evidente consideración; en ellas se ve una aspiración de que todas las exigencias constructivas se cumplan plenamente, pero sin el pesado sistema de arbotantes y estribos necesario en el gótico francés. Con ello se pudieron conseguir, además, las impresiones espaciales deseadas.

Es por eso que el gótico inglés concede gran valor a la horizontalidad de los nervios de coronación y presta gran atención a todos los medios arquitectónicos con los que se puede reforzar la acentuación de la altura. Los nervios tienen un significado mucho más decorativo que constructivo; se elevan como ramilletes sobre las columnas y los muros, y se despliegan en las bóvedas conduciendo la mirada hacia arriba y dando la impresión de que la altura de la iglesia es mayor que lo que en realidad es.

Las catedrales francesas se levantan sobre el suelo a mucha mayor altura que las inglesas y, sin embargo, esta diferencia de altura no resulta perceptible.

Típicas bóvedas inglesas son las llamadas de abanico, en las que los nervios surgen del arranque en forma de abanico o embudo. Las plementerías pueden ser de muy reducido espesor; es como si se tratara de verdaderas láminas de piedra

colocadas entre los nervios. Evidentemente la construcción con madera ha ejercido aquí influencia sobre la construcción abovedada.

En estas bóvedas es notable la semejanza, sea en la forma, sea en la función (sobre todo aplicado a la cubierta de naves de iglesias y espacios centrales) con las construcciones de hormigón armado modernas, como, por ejemplo, el sistema de losas sobre capiteles fungiformes.

En el Gótico se ve progresivamente que, junto a un admirable ingenio constructivo, se hace valer también el derecho a aspirar a un sentimiento decorativo. Por eso no es suficiente una teoría del arte de la construcción basada exclusivamente en el progreso estructural de los medievales, en la mejora de la compresión de las posibilidades de los materiales a la vista de las estructuras, y en el empleo de elementos constructivos para asegurar la estabilidad de las edificaciones. Por el contrario, se tiene que admitir también que los antiguos maestros se dejaron guiar por sus preferencias, que hicieron determinadas bóvedas porque un anhelo interno les encaminó a ello. El desarrollo de las bóvedas reticuladas y estrelladas da explícitas muestras de ello.

Iglesia basilical e iglesia salón.

Un ejemplo diferente se encuentra en la iglesia de tipo salón. Desde el punto de vista constructivo, esta iglesia, en la que todas las naves tienen igual altura, ofrece determinadas ventajas comparada con la basilical, en la que la nave principal sobresale a mayor altura que las laterales.

En la iglesia salón las naves principal y laterales se cubren con bóvedas a la misma altura; puesto que ambas naves cubren aproximadamente el mismo ancho, surgieron iglesias con dos y tres vanos que podían soportar los empujes de viento mucho mejor que las basilicales (si la altura de la cubierta no era demasiado grande).

Es evidente que en la construcción de este tipo de iglesia los maestros constructores se dejaron guiar por consideraciones prácticas. La iglesia salón encontró sobre todo difusión en la orden mendicante que se dedicaba a los trabajos parroquiales y, naturalmente, tenía que pensar en construir sus iglesias de manera muy económica. Pero aquí también intervino un factor estético. En lugar de la gran altura que el tipo basilical naturalmente posee y por el que nació esa impre-

sión ascensional de despegarse de todo lo terrenal, se buscó un despliegue del espacio en anchura y profundidad; el sentimiento de belleza tuvo aquí que satisfacerse con amplios efectos de perspectiva.

En las catedrales basilicales, de altura «celestial», triunfó el espíritu sobre la materia gracias a la genialidad de los constructores de bóvedas. Son sobre todo creaciones de artistas de pensamiento lógico y clara visión; típicas expresiones del espíritu latino. En las amplias iglesias salón sentimos algo de la añoranza que en todo hombre estimula hacia lo más elevado, hacia lo ideal. Pero este sentimiento es indefinido, ni claro ni confuso. Las vagas lejanías a las que miramos en una iglesia salón, la fuerte iluminación de las naves laterales mientras que la nave central se envuelve en la penumbra, de forma que aquí los valores ideales están en proporción inversa a la intensidad de la luz, crean un cierta atmósfera de intranquilidad. No es sin razón que la mayoría de ejemplos de este tipo de iglesia se encuentren en Alemania, donde nació el «weltschmerz», el desengaño de la vida, y más de un escritor cae en el pecado de entrar en profundas consideraciones en un lenguaje oscuro.

La construcción abovedada en el Renacimiento

La construcción abovedada del Renacimiento tiene otros ideales. En Italia, el espíritu de los romanos, su cultura, permanecieron vivos incluso en los siglos medievales. Y, naturalmente, se estuvo en contra de la manera gótica de construir, en la que el énfasis se ponía en los miembros resistentes, sobre los pilares y columnas que, como musculosos soportes, cargan el peso de las bóvedas, mientras que los muros solo se toleran como relleno. En Italia se busca en el espíritu clásico, el equilibrio, «la belleza» y este ideal se ve desagradablemente afectado si la atención se fija demasiado enfáticamente en la construcción. El ideal del Renacimiento era, por consiguiente, la obra que bella y armónicamente diera expresión a solamente una idea, de manera que los asuntos secundarios aparecieran como tales. Este ideal se alcanzó de la forma más completa en el edificio central coronado con una gran cúpula.

Los maestros constructores renacentistas encontraron numerosos restos de obras monumentales romanas en su propio entorno, que fueron estudiadas con cuidado y fervor. Dispusieron de ejemplos de grandes cúpulas en estilo roma-

no y de la experiencia obtenida con las construcciones góticas, de manera que se pudieron poner a trabajar bien equipados para su tarea. Vemos desplegarse en este notable periodo los más grandes talentos, genios dedicados a las artes plásticas, y alcanzar los más altos resultados a los que el hombre puede llegar.

También en el ámbito de la construcción, donde la construcción abovedada se benefició de este impulso. Las múltiples formas abovedadas del Gótico fueron sustituidas por bóvedas de organización más tranquila, sobre todo las bóvedas de cañón y las cúpulas, en las que también con frecuencia dispusieron nervios, fruto de la división regular de la bóveda en casetones. Un logro en la construcción abovedada se alcanzó mediante la cúpula de doble cáscara —ya aplicada por los persas siglos antes y también más tarde realizada por tempranos maestros medievales— con lo que este tipo abovedado alcanzó su completo desarrollo.

Los nombres de los más grandes arquitectos italianos están ligados al problema de la construcción de la cúpula. Las bóvedas se pueden estudiar aquí poniendo bajo la lupa la historia de la construcción de algunos de los más grandes monumentos. Cada uno muestra en su construcción el talento de su autor, ya que en el Renacimiento el arte era extraordinariamente individual, y los arquitectos quisieron inmortalizar sus nombres.

Otro aspecto del arte del abovedado del Renacimiento lo encontramos en otras bóvedas más modestas, que en Italia y en España se emplearon en todas partes, y que todavía tienen aplicación en nuestros días: las bóvedas tabicadas. Por eso, un estudio de esta construcción abovedada convertida en auténtico arte popular merece la pena sobradamente. Se trata aquí de un arte que hace uso preferente de ladrillos delgados y ligeros. En la técnica de la ejecución con estos materiales se ha adquirido un alto grado de habilidad, tanta, que incluso hoy en día esta técnica tiene aplicación a considerable gran escala en las modernas construcciones abovedadas de América.

La construcción abovedada del Barroco

El Renacimiento fue seguido del Barroco. En este periodo estilístico un nuevo ideal arquitectónico vino a plantear nuevas exigencias a la técnica del constructor de bóvedas. En este periodo sucesor del Renacimiento se llegó a una

intranquilidad interna por parte de los artistas y ésta se expresó también en el arte.

No se encontró ya satisfacción con la creación de obras armoniosas, de equilibrio, de interiores más claros y transparentes. Por el contrario, se prefirieron interiores en los que se llegara a la sugestión de que los espacios, desdibujados, se continuaran sin límites, en los que algo se trasluciera de la propia e interna intranquilidad.

Las plantas de las cúpulas se hicieron a veces en forma oval y, con frecuencia, se combinó el espacio principal con los espacios secundarios, de manera que la mirada pudiera ir cada vez más lejos y nuevos misterios se pudieran suponer en las partes secundarias.

Se buscaron imágenes espaciales más complejas, soluciones, que la sola construcción de una cúpula, en cuyo espacio sólo está presente un eje principal, no podía proporcionar. Esas formas espaciales más complejas se pudieron obtener construyendo un eje longitudinal en la iglesia cubierta por cúpulas, de manera que al eje vertical principal situado en el medio de la cúpula se le añadiera otro eje principal horizontal discurriendo por el medio de la nave de la iglesia.

El ideal arquitectónico de la construcción de la iglesia se puede formular como sigue: la creación de un espacio de iglesia en el que se pasara del eje longitudinal a la cúpula de forma armoniosa. Los grandes maestros constructores barrocos dedicaron su talento a este problema que resolvió de la forma más completa el maestro de Würzburg, Balthasar Neumann, en la ricamente abovedada iglesia de Vierzehnheiligen en Lichtenfels (Lám. 83).

La construcción abovedada moderna

En este último periodo a tratar, encontraron aún aplicación muchos hallazgos en el campo de la construcción abovedada. Nuestro tiempo no ha terminado repentinamente con la técnica transmitida; más bien es lo contrario. El arte del abovedado es un arte conservador, pero esto no quiere decir que el maestro constructor tenga necesariamente que recurrir a formas antiguas; en absoluto es ese el caso. Tampoco que haya llegado al fin del desarrollo de una técnica. Pero sí que las experiencias, el conocimiento que nuestros precursores reunieron, son también nuestro patrimonio, que de él *podemos* y también *debemos* disponer so pena de empobrecimiento.

Además, la construcción abovedada se presta a ulteriores desarrollos. Por nuestro conocimiento de la matemática y su aplicación en la construcción de bóvedas estamos en condiciones de hacer bóvedas con más seguridad, porque podemos determinar por adelantado mejor que antes si su resistencia será suficientemente grande.

Un ejemplo lo da la moderna construcción de cúpulas, en las que la experiencia obtenida con las bóvedas de pequeño espesor del Renacimiento se aprovecha para aplicaciones modernas. Junto a ello juegan además un papel materiales auxiliares como el hormigón o el acero.

La técnica tradicional todavía no ha dicho la última palabra. Es posible e incluso probable que esté a las puertas un nuevo desarrollo con aspectos muy interesantes. No es temerario esperar que los ideales de construcción modernos puedan encontrar su total solución en la construcción abovedada.

Las construcciones en hormigón armado y acero no pueden olvidarse cuando es una condición absoluta lograr la mayor economía posible. Pero las muchas ventajas prácticas de la construcción con ladrillo, y por tanto de cúpulas, en el aspecto de la estética, de la acústica, de la capacidad de aislamiento, etc., justifican en su totalidad el empleo de bóvedas de ladrillo en las que se haga uso del moderno conocimiento de la mecánica.

Tal como se ha dicho, el estudio de la construcción abovedada histórica es extraordinariamente útil para mejorar la comprensión de esta importante técnica. Pero sobre todo es imprescindible el conocimiento de los procedimientos técnicos para tener una buena comprensión de un periodo determinado. Así, también el estudiante de historia del arte está obligado a estudiar la construcción abovedada.

En el recorrido a través de los siglos que en los siguientes apartados vamos a emprender como estudio de la construcción abovedada, nos pararemos aquí y allá en uno u otro monumento. Esto será principalmente para que, por su análisis, se pueda entender su mayor o menor utilidad para el constructor de bóvedas.

Las particularidades históricas se tratarán como cuestiones secundarias. No se aspirará, por consiguiente, a ofrecer un desarrollo fuertemente metódico, históricamente exacto, del curso seguido por la construcción abovedada. De vez en

cuando será deseable resumir en una única descripción diferentes edificios cuyos orígenes y desarrollo estén muy lejos los unos de los otros.

Frecuentemente, será necesaria también la adquisición de una idea adecuada de la técnica de las bóvedas, para dar una comprensión del monumento que ha sido cubierto con ellas. Por eso, junto a las siguientes consideraciones, se tratará también la relación de la bóveda con el edificio en el que fue construida.

Se estudiarán, por tanto, a continuación:

– la construcción abovedada romana
– la construcción abovedada bizantina, persa, islámica e hindú.
– la construcción abovedada medieval
– la construcción abovedada en el Renacimiento y en el Barroco.
– la construcción abovedada moderna

Para completar el campo de la construcción abovedada se dedicará una discusión separada al análisis estático de las bóvedas en el capítulo siguiente.

4.1 La construcción abovedada romana

Métodos y materiales

Los romanos fueron grandes constructores de bóvedas. Utilizaron una forma de trabajo económica, lo que en este caso significa que desarrollaron un método por el que se podían poner a trabajar muchos operarios de los que sin embargo pocos necesitaban tener buena capacitación.

El material usado era principalmente el ladrillo de poco espesor, fabricado en distintos tamaños y combinado con hormigón romano. De vez en cuando emplearon también sillares de piedra en sus bóvedas.

Podemos diferenciar dos formas de trabajo por la técnica empleada:

ARMADURAS DE ARCOS: Se realizaban en la bóveda arcos o anillos de ladrillo a distancias aproximadamente iguales (Lám. 22, figs. 2, 3, 4; Lám. 23, fig. 5). En estos arcos, cada cuadro o cinco hiladas, sobresalían hacia fuera ladrillos que formaban como si dijéramos un anclaje con el relleno de la bóveda, formado por capas horizontales de hormigón romano.

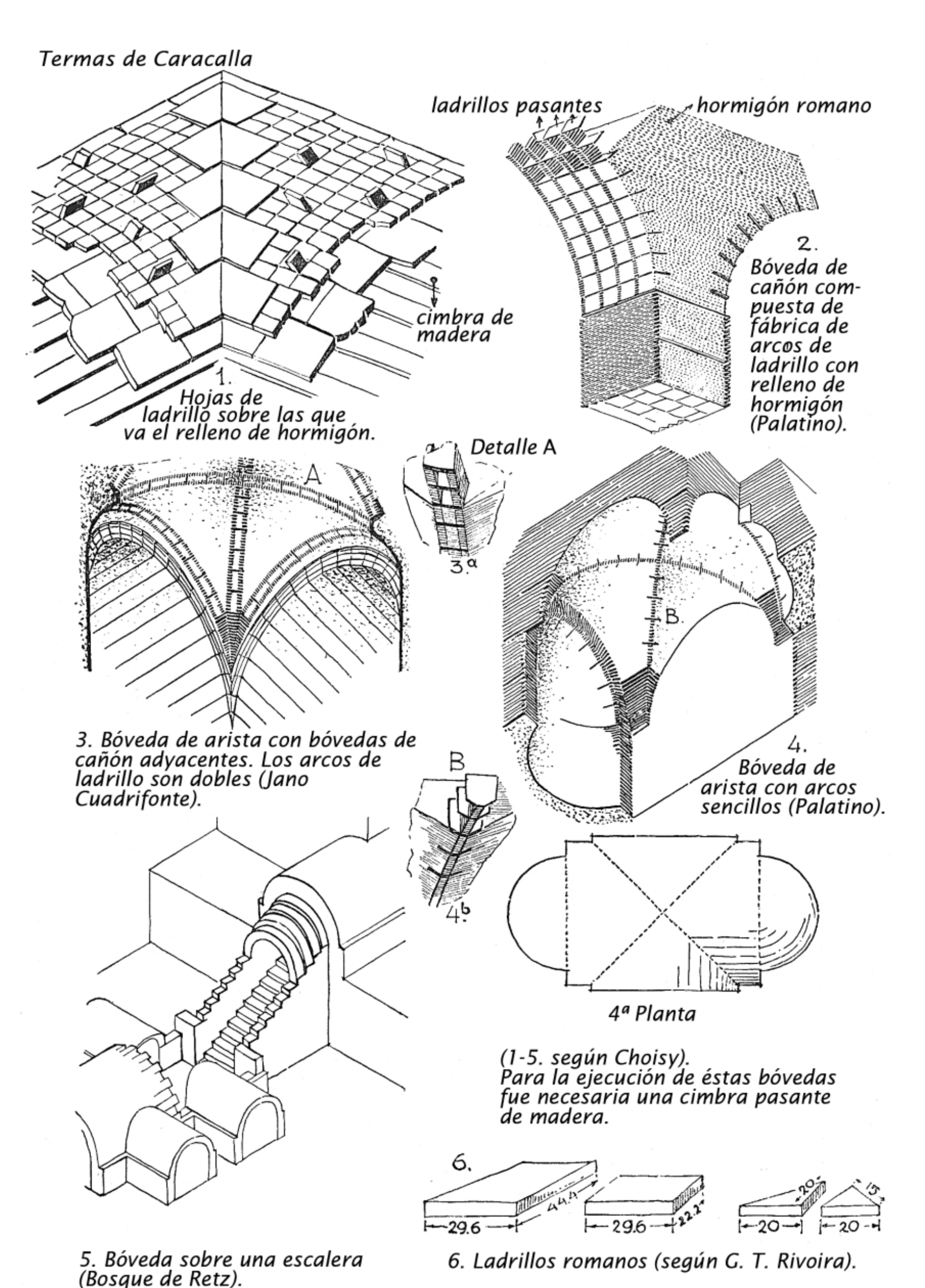
Los arcos, que tenían que ser realizados por operarios cualificados, daban a la bóveda, sobre todo durante el endurecimiento del mortero, una considerable rigidez descargando al mismo tiempo, según Choisy, la cimbra. Esto último se puede poner en duda ya que los arcos se ejecutaban a la vez que el macizado de hormigón. Este relleno se pudo realizar por mano de obra poco especializada.

Según Giovannoni, este sistema encaja de forma maravillosa con la organización necesaria para la realización de una obra por los romanos; es una precursora de la moderna técnica del hormigón. Con ello se consiguió economía y rapidez de ejecución en las construcciones no tomándose en consideración sus desventajas, principalmente la necesidad de un apoyo durante la ejecución, es decir, la colocación de pesadas cimbras, y el gran empuje lateral ejercido sobre los arranques. Los asientos y grietas en estas bóvedas podrían haber sido fatales, dado que las grietas en la construcción casi monolítica se podrían haber multiplicado fácilmente. Los romanos querían eliminar estos inconvenientes y para eso sirvieron los arcos de albañilería, de manera que la bóvedas, en cierto modo, se hicieron «armadas».

No se quiere decir con ello que este método de construcción se haya desarrollado *progresivamente*, ya que se pueden señalar diferentes bóvedas de época tardo-romana en las que se vuelve hacia un esquema más primitivo. Giovannoni compara el trabajo arquitectónico-constructivo de los romanos con un gran taller de forja en el que continuamente se experimenta y donde un desarrollo técnico de gran duración se pierde a saltos en diferentes periodos.

Mediante los citados arcos de ladrillo en el espesor de las bóvedas, éstas se dividieron en partes portantes y partes que servían de relleno. Esto pudo ofrecer ventajas en la ejecución, ya que durante el largo periodo de endurecimiento del mortero, que podía llegar a ser de un año, y el subsiguiente descimbrado, estos arcos suministraban la necesaria rigidez manteniendo la forma de la bóveda, localizándose las posibles grietas. También ejercían la misma función en caso de asientos en la cimentación. Pero el interés de los arcos salta a la vista sobre todo en la construcción de cúpulas. Según las modernas teorías, una cúpula, por efectos de los esfuerzos internos, se puede romper en una serie de segmentos o lunas que, al igual que los arcos, producen empujes. Las grietas surgen en el lugar indi-

LÁMINA 22. MÉTODOS ROMANOS DE ABOVEDADO



5. Bóveda sobre una escalera (Bosque de Retz).

6. Ladrillos romanos (según G. T. Rivoira).

cado por la inserción de rígidos arcos de ladrillo, situados según los meridianos; el peligro para la estabilidad queda neutralizado gracias a un eficaz contrarresto en la base mediante un relleno (Lám. 26, fig. 1).

En la cúpula del templo de Minerva Médica queda claro que los nervios tienen una función portante (Lám. 25, figs. 2, 2ª). ¡La construcción se corresponde de forma notablemente exacta a las teorías modernas!

ARMADURAS TABICADAS: Otra forma de construcción consistía en ejecutar una primera hoja de ladrillos sentados de plano sobre la que colocaba una segunda hoja de ladrillos de menor tamaño. A veces se ponían también algunos ladrillos de canto entre los sentados de plano, con lo que se obtenía una mejor unión con el hormigón que, en capas horizontales, se colocaba sobre ella (Lám. 22, fig. 1; Lám. 23, fig. 3). Las hojas de ladrillo colocadas sobre la cimbra de madera formaban una bóveda que podía soportar el relleno de hormigón ejecutado encima por operarios inexpertos. El apoyo de la cimbra tampoco necesitaba construirse demasiado resistente.

En Francia y en Italia este método ha estado en uso durante siglos como herencia de los romanos; J. F. Blondel lo describe en su *Cours d'Architecture* y señala que, después de 1750, esta manera de abovedar, aunque aplicada a otras circunstancias, fue otra vez ampliamente empleada en Francia (Lám. 85, fig. 5).

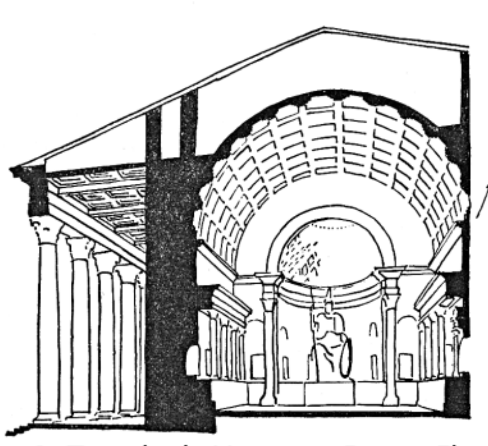
RELLENOS Y MORTEROS: Para el hormigón los romanos eligieron un material ligero, tufa o piedra pómez asentada sobre una gruesa capa de mortero. A veces incluso completaban las bóvedas con vasijas cerámicas vacías, disponibles en gran número, ya que en ellas, desde las provincias lejanas, se enviaban todo tipo de líquidos y especias a la metrópoli.

El mortero que empleaban era, por lo general, hidráulico obtenido añadiendo puzolana a su masa.

Clases de bóvedas

Los romanos conocieron la bóveda de cañón, la de arista, la cúpula y la semicúpula, que fueron a menudo decoradas con casetones, bien de forma cuadrada o bien de forma octogonal, y que a veces ascendían según líneas en espiral.

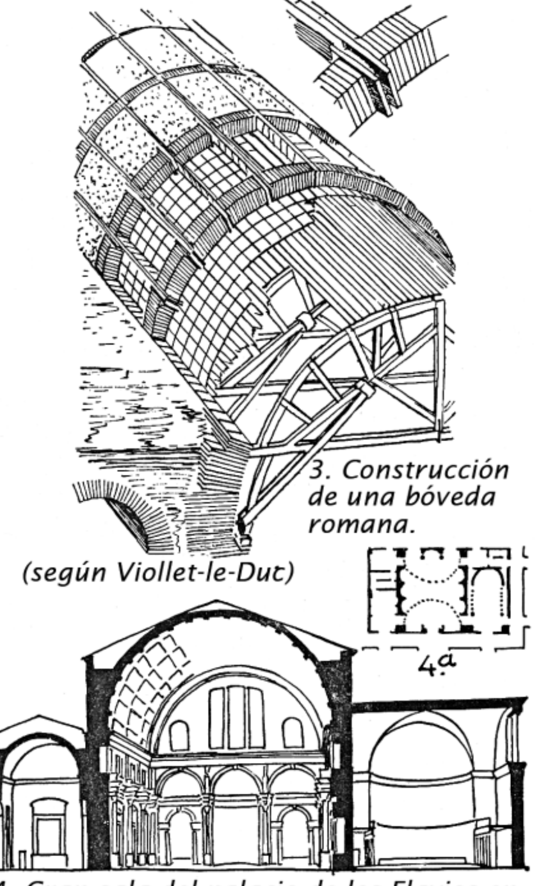
LÁMINA 23. MÉTODOS ROMANOS DE ABOVEDADO



1. Templo de Venus en Roma. El contrarresto de la gran bóveda se realiza por gruesos muros (según H. Lömpel).



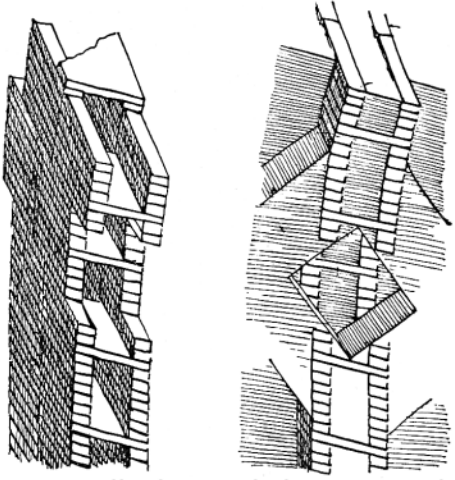
2. El templo pequeño de Baalbek. Las columnas contra el muro estabilizan la construcción (según H. Lömpel).



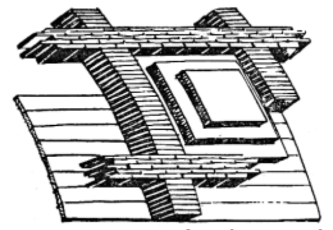
3. Construcción de una bóveda romana.

(según Viollet-le-Duc)

4. Gran sala del palacio de los Flavios en Roma. Reconstrucción de Bühlmann (según H. Lömpel).



5. Detalle de uno de los nervios de la basílica de Constantino; a la izquierda el nervio ha sido representado sin, y a la derecha con, relleno y decoración de casetones.



6. La construcción de una bóveda de casetones (5 y 6 según Choisy).

Además de esto, estaban familiarizados con la construcción de bóvedas anulares y con diferentes voladizos necesarios para tender una cúpula circular sobre un espacio con planta rectangular. En general, para cubrir un espacio se elegía una bóveda de cañón a pesar de que no les arredrara hacer bóvedas de arista incluso aunque los lados del espacio no tuvieran las mismas medidas. Las líneas de clave de las dos bóvedas secantes entre sí se construían normalmente a nivel y de la misma altura, de manera que la bóveda de menor luz estaba peraltada. Se obtenía así una intersección típica de dos bóvedas de cañón con luces desiguales. En la dirección de las líneas de intersección se construían arcos de ladrillo realizados por obreros expertos. La ejecución no ofrecía dificultades dado el pequeño formato de los ladrillos. A veces se hacían dos o tres arcos juntos lo que daba a la bóveda una extraordinaria rigidez (Lám. 22, figs. 2–4).

Los romanos aprovecharon al completo las ventajas de la bóveda de arista que les permitió abrir al espacio interior huecos laterales de iluminación a gran altura.

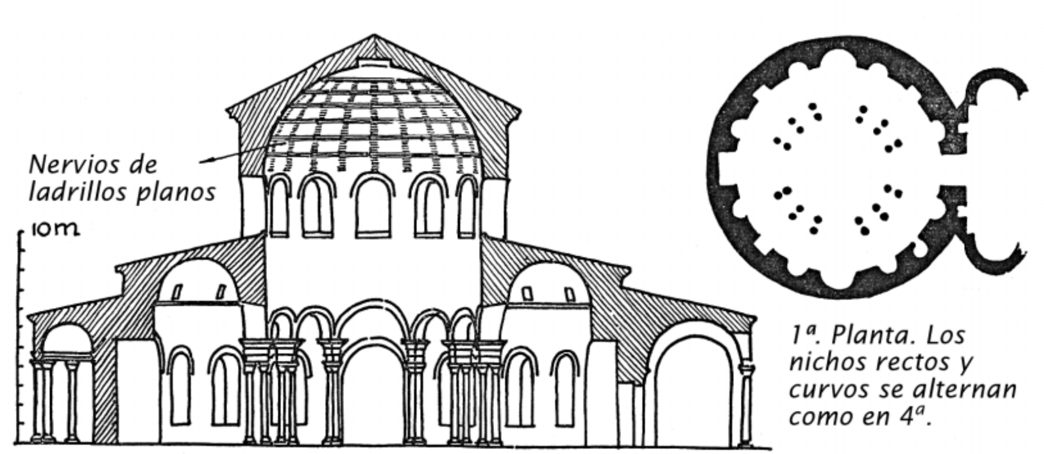
Como norma buscaron en sus métodos de abovedado las soluciones más sencillas. Si era posible evitaban la intersección de dos bóvedas trazando, por ejemplo, una algo más alta que la otra con lo que la clave de la más baja se situaba bajo el arranque de la más alta. Si se tenía que abovedar una escalera sólo entonces, excepcionalmente, se empleaban bóvedas de cañón rampantes, debido a la complicada unión de sus extremos superior e inferior. Por este motivo, este tipo de bóvedas se componían preferentemente de anchos arcos ascendentes en forma escalonada (Lám. 22, fig. 5).

Que estas construcciones simplificadas no fueron realizadas por ignorancia se demuestra en algunas bóvedas romanas en las que aparecen complicados cortes de piedras. Así, hay bóvedas romanas de piedra en las que sobre una cúpula cónica se abren lunetos de sección semicircular y también bóvedas en rincón de claustro sobre espacios poligonales.

En la misma Roma emplearon rara vez la piedra aunque a menudo nos encontramos bóvedas de piedra en las provincias fuera de Italia, sobre todo en el Oriente (Lám. 25, fig. 1).

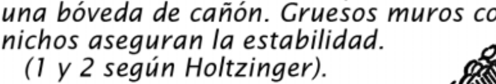
Además de las principales bóvedas citadas hay también muchos tipos secundarios. Las cúpulas peraltadas son bastantes excepcionales, pero las cónicas se ven

LÁMINA 24. BÓVEDAS ROMANAS



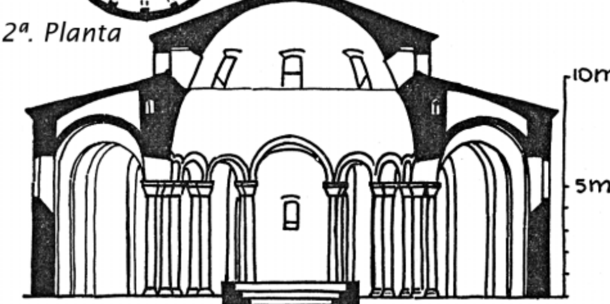
1ª. Planta. Los nichos rectos y curvos se alternan como en 4ª.

1. S. Constanza de Roma. Sobre el espacio central se sitúa una bóveda (luz 11 m), sobre el pasillo anular una bóveda de cañón. Gruesos muros con nichos aseguran la estabilidad. (1 y 2 según Holtzinger).

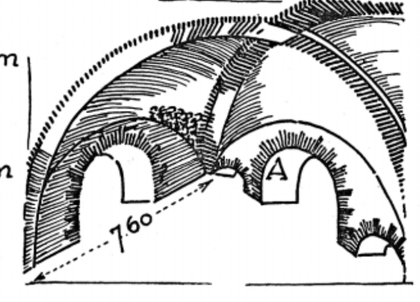


2ª. Planta

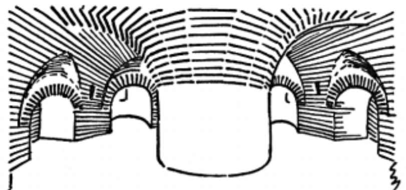




2. Iglesia bautismal en Nocera. La cúpula fue construida por hiladas horizontales hasta la clave. Luz de la cúpula = 11,50 m.



3. Bóveda de arista sobre nervios en la villa de "Sette Bassi" Roma. El ancho de los nervios es 0,70 m (según Rivoira).

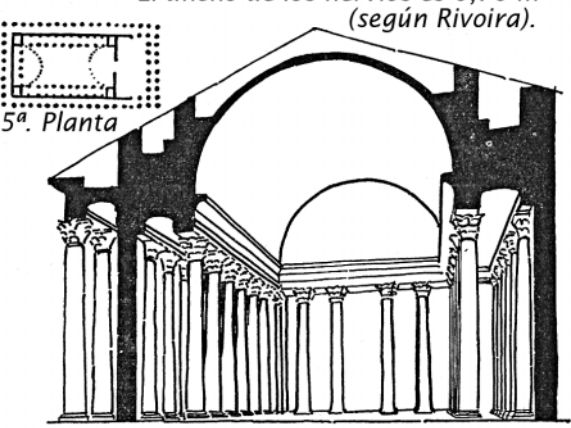


4. Sótano con bóveda de cañón anular en la Torre de los Esclavos en Roma.



4ª. Planta (según Rivoira)

5ª. Planta



5. Gran templo de Baalbek. El empuje de la bóveda de cañón es absorbido por las dos filas de columnas (según H. Lömpel).

con más frecuencia. Hay incluso bóvedas de arista nervadas que hacen pensar en las construcciones románicas (Lám. 24, fig. 3); pero también hay formas más complicadas, tales como intersecciones de superficies cilíndricas con otras bóvedas cóncavas obviamente realizadas para obtener interesantes efectos espaciales. (Estas aspiraciones se pueden ver siglos más tarde en el Barroco.) Se han podido reconstruir formas con esa complicación en la villa Adriana (117–138 d.C.) en Tívoli (Lám. 25, fig. 3).

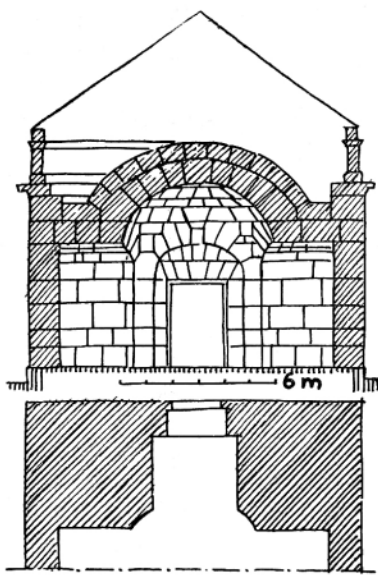
El equilibrio de las bóvedas

Las bóvedas romanas eran pesadas por lo que ejercían empujes considerables, que fueron absorbidos, en la medida de lo posible, por muros con nichos y por otras partes estabilizadoras del edificio. Para ello, los espacios se situaban con preferencia unos en relación a otros de forma que los muros portantes de las bóvedas se estabilizaran unos contra otros absorbiendo sus empujes. Si esto no era posible, entonces se colocaba un exceso de material, de manera que el empuje se pudiera neutralizar, o se ponían contrafuertes.

Uno de los espacios principales de las termas de Diocleciano, que más tarde se reformó como nave principal de la iglesia de Santa Maria degli Angeli en Roma (1563–66), muestra tales contrafuertes (Lám. 26, fig. 2). Un bello ejemplo de equilibrio lo proporciona la basílica de Majencio y Constantino. Consta de un espacio principal de 82,4 × 26 m cubierto por bóvedas de arista en el que la luz penetra en el interior por ventanales. Estas bóvedas de arista se contrarrestan por bóvedas de cañón con las que se cubren los espacios secundarios y por contrafuertes que, al igual que en Santa Maria degli Angeli, sobresalen por la cubierta. Para asegurar la estabilidad, estos contrafuertes fueron construidos como pesadas masas de ladrillo, casi torres masivas, ofreciendo su apoyo a la estructura total. (Lám. 26, figs. 3, 3ª).

En el abovedado de las cellas de los templos, que la mayoría de las veces se hizo con bóvedas de cañón, se colocó hacia el interior o hacia el exterior, una fila de columnas para crear con ellas una sólida unidad capaz de absorber el empuje inclinado de las bóvedas. El gran templo de Baalbek tenía una fila de columnas tanto en el interior como en el exterior de los muros. Además las columnas esta-

LÁMINA 25. BÓVEDAS ROMANAS



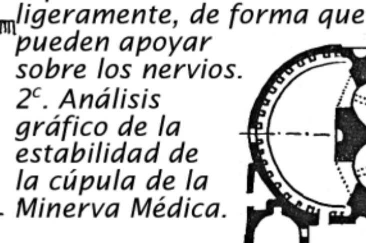
1. Planta y sección de una cúpula construida en piedra (Tumba de Casano).



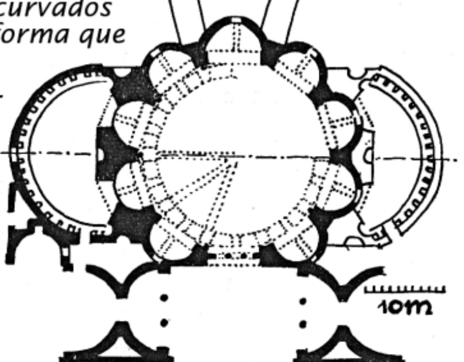
2ª. Nervio de la cúpula de la Minerva Médica. Los paños de la cúpula han sido curvados ligeramente, de forma que pueden apoyar sobre los nervios.



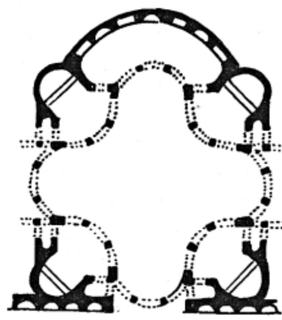
2. Sección de la Minerva Médica.



2ᶜ. Análisis gráfico de la estabilidad de la cúpula de la Minerva Médica.



2ᵇ. Planta de la cúpula con anexos (Roma).

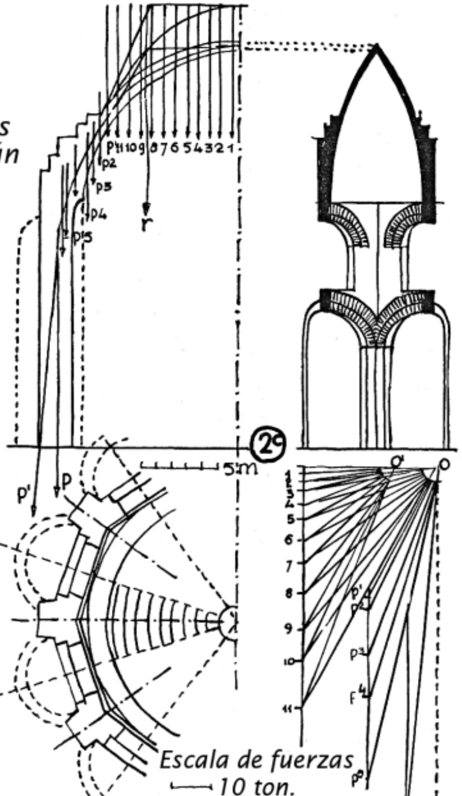


3. Planta de una cúpula antigua romana.

1-4. Diferentes tipos de bóvedas empleadas por los romanos (1-3 según G. Giovannoni).



4. Interior de un templo redondo en Riez, Francia (según D. Thiénon).



ban cargadas con un masivo muro de fábrica, con lo que el conjunto se hacía aún más estable (Lám. 24, fig. 5).

El Panteón de Roma

La construcción del Panteón es extraordinariamente instructiva. Durante siglos se ha estudiado esta grandiosa obra y se han escrito numerosos ensayos y consideraciones sobre ella. Piranesi (1720–78) tuvo ocasión de observar la construcción desde un andamio; dio una descripción que fue aceptada por autores posteriores, pero que no concordaba totalmente con la realidad y que ha originado mucha confusión (Lám. 26, fig. 1). Según Piranesi la cúpula fue dividida internamente por un sistema de arcos de descarga que se continuaba hasta un gran anillo en el óculo.

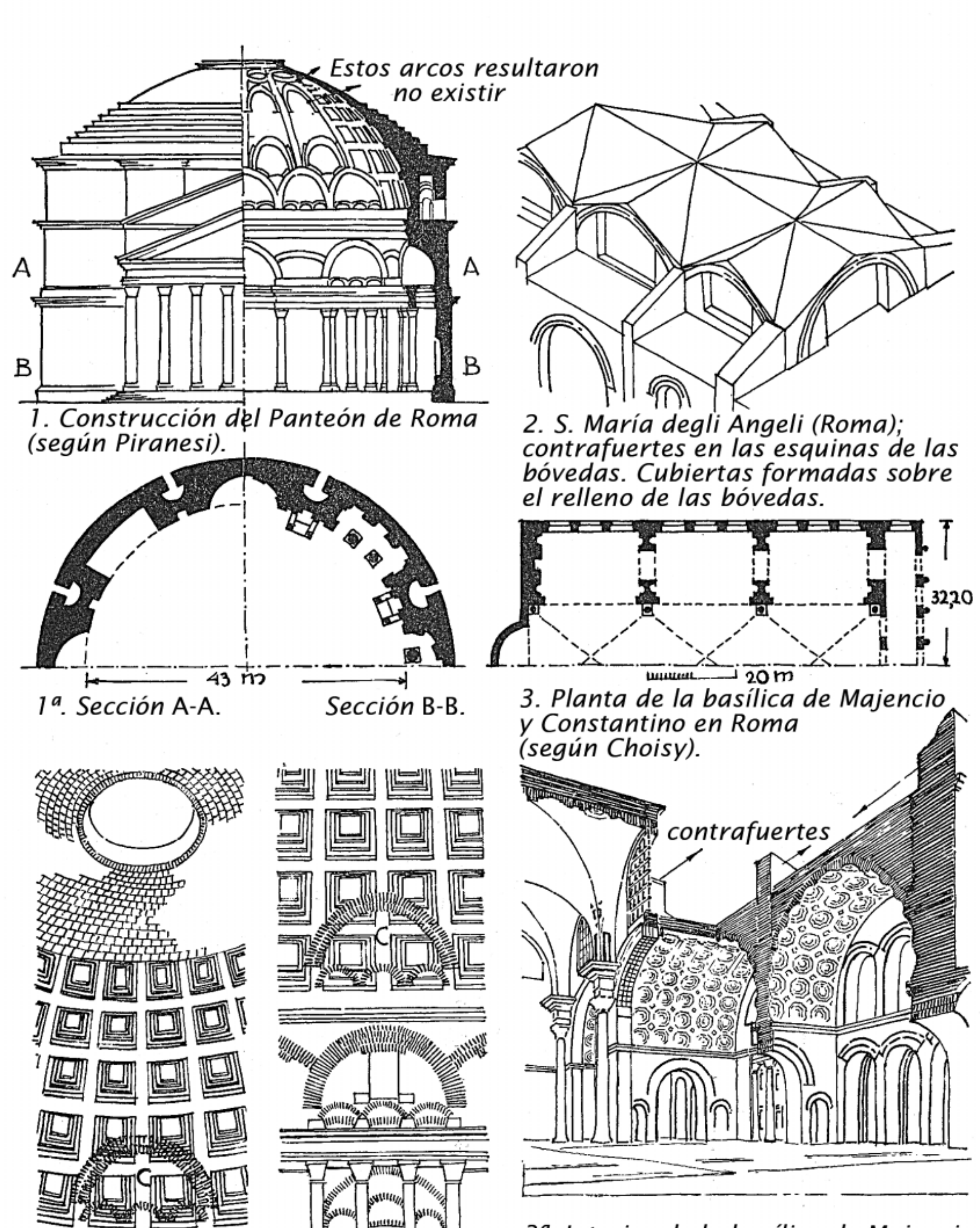
Viollet-le-Duc opinaba que la cúpula constaba de dos capas diferentes; Chedanne y Canina indicaron cada uno por separado cómo habría sido construida la cúpula. También Auguste Choisy, el gran conocedor de las construcciones abovedadas romanas, expresó su punto de vista, basado en las observaciones de Piranesi. En posteriores investigaciones, entre otras la realizada por Rivoira, se obtuvo más luz sobre el asunto; de ellas resultó que los arcos de descarga están presentes realmente en la parte más baja de la cúpula pero faltan en la parte alta.

Dos hileras de fuertes arcos conducen el peso de la cúpula hacia las partes macizas del pesado muro perimetral (Lám. 26, fig. 16). En dicho muro se extrajeron nichos tanto para reducir el peso de la bóveda como para disponer una galería de servicio al pie de la cúpula. Esta galería podía ser útil para actividades de conservación y mantenimiento, ya que las aperturas y cavidades del grueso tambor están unidas entre sí y son accesibles mediante escaleras (Lám. 26, fig. 1ª).

Además de los arcos citados hay también otros más pequeños que sirven para que el peso de la fábrica, que vendría a cargar sobre las columnas ejerza sobre ellas un empuje concentrado (Lám. 26, fig. 1ᵇ; Lám. 27, fig. 2ª).

A pesar de la gran masa del conjunto, el constructor estuvo atento para disminuir el peso todo lo posible allí donde pudiera ser causa de grandes empujes laterales. Las partes con función de carga y soporte de la obra fueron

LÁMINA 26. EL PANTEÓN Y LA BASÍLICA DE MAJENCIO Y CONSTANTINO EN ROMA



1. Construcción del Panteón de Roma (según Piranesi).

2. S. María degli Angeli (Roma); contrafuertes en las esquinas de las bóvedas. Cubiertas formadas sobre el relleno de las bóvedas.

1ª. Sección A-A. *Sección* B-B.

3. Planta de la basílica de Majencio y Constantino en Roma (según Choisy).

1ᵇ. Construcción de la cúpula del Panteón (según Rivoira); dos hileras de arcos de descarga una encima de la otra conducen el peso hacia los macizos de apoyo.

3ª. Interior de la basílica de Majencio y Constantino (según Lömpel). Las bóvedas de arista de la sala central están contrarrestadas por contrafuertes. Los muros reciben el apoyo de las bóvedas de cañón sobre los vanos laterales; ventanas de iluminación en los muros sobre las bóvedas de cañón.

hechas con materiales pesados. El arquitecto Alberto Terenzio realizó en 1929 un informe sobre el estado del Panteón y sobre las reparaciones necesarias. Para ello hizo una detallada exposición de los materiales con los que el monumento había sido construido. Los muros no fueron hechos de un material homogéneo; por el contrario, constan de un núcleo de piedras pesadas, alternando hileras de travertino y tufa, contra las que, tanto por la parte de fuera como por la de dentro, se ejecutó un muro de ladrillo de aproximadamente 36 cm de espesor. Verdugadas de grandes ladrillos, espaciadas regularmente, forman como si dijéramos un anclaje en el grueso de los muros (Lám. 27, fig. 1).

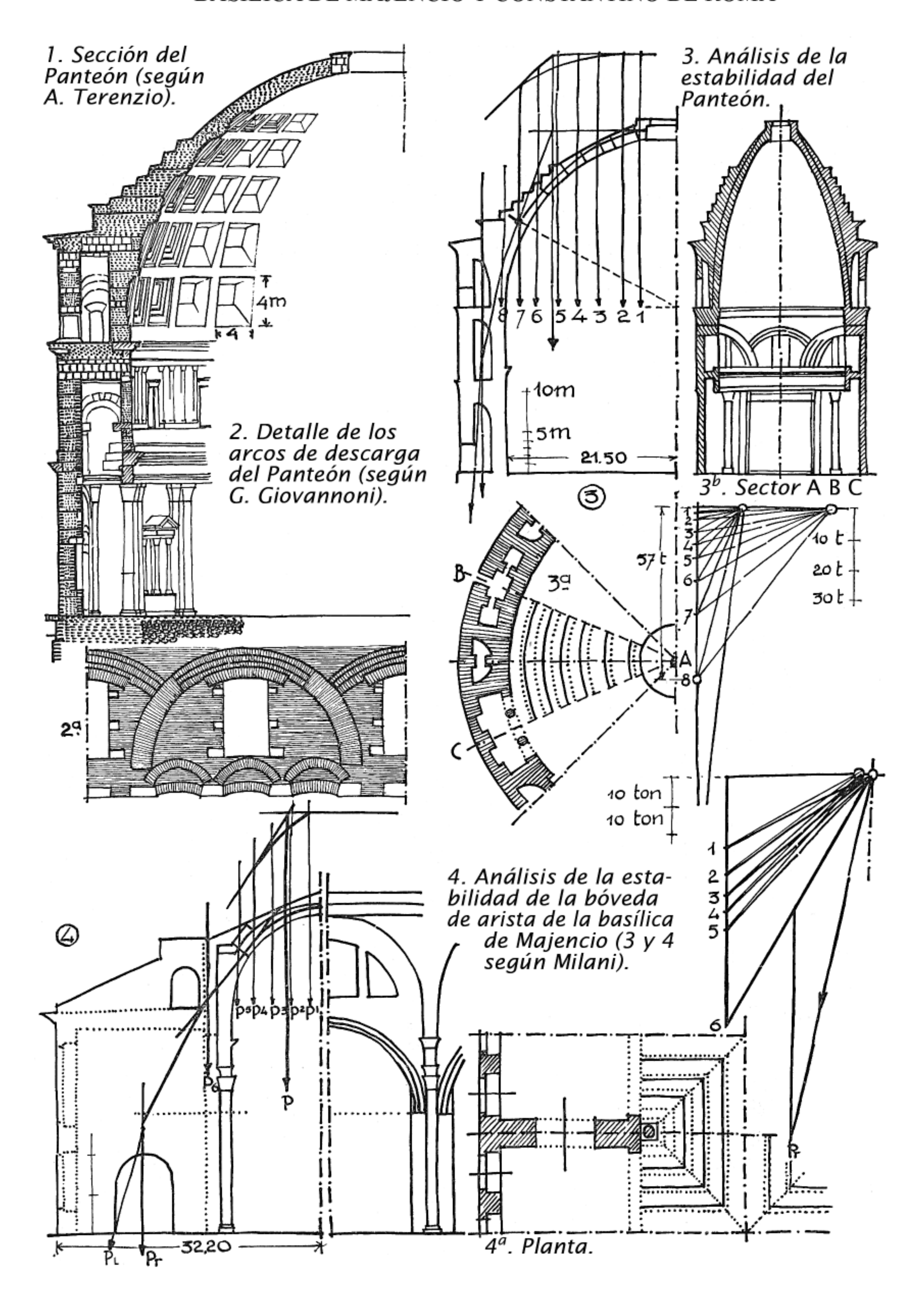
La cúpula fue construida sobre una cimbra giratoria sobre la que se colocaron las contraformas de los casetones; está formada, hasta la coronación, por hiladas horizontales. La parte superior de la cúpula fue realizada con capas muy ligeras de tufa y piedra pómez; además los profundos casetones proporcionaron un gran ahorro de material sin disminuir la resistencia. (Que el ahorro conseguido no es despreciable puede constatarse si se tiene en cuenta que los casetones inferiores son de 4×4 m y 0,65 m de profundidad.) Finalmente, el peso se redujo de forma importante con la colocación del gran óculo de nueve metros de diámetro.

El ingeniero Milani hizo cálculos estáticos de algunas construcciones romanas, entre ellas, la Basílica de Majencio y Constantino y el Panteón, demostrando que las líneas de empujes podían trazarse de forma satisfactoria. Desde el punto de vista estático el Panteón está, por tanto, en perfecto orden; esto también lo ha demostrado el paso del tiempo (Lám. 27, figs. 3, 4).

Esta construcción, con un diámetro de 43,6 m y una altura de igual dimensión, ha podido hacer frente a los siglos. Bien es verdad que han surgido debido a asientos algunas grietas, pero éstas, según Rivoira, no prosiguen hasta los arcos, por lo que para él es claro que dichos arcos prestan un buen servicio. Sin embargo en las últimas investigaciones se ha llegado a constatar que, a pesar de los arcos, las grietas sí continúan. Errar es humano.

Terenzio calculó la tensión ejercida sobre el suelo. Es bastante grande, a saber de 0,45 N/mm^2, si se admite que todos los cimientos de la construcción están cargados por igual.

LÁMINA 27. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL PANTEÓN Y DE LA BASÍLICA DE MAJENCIO Y CONSTANTINO DE ROMA

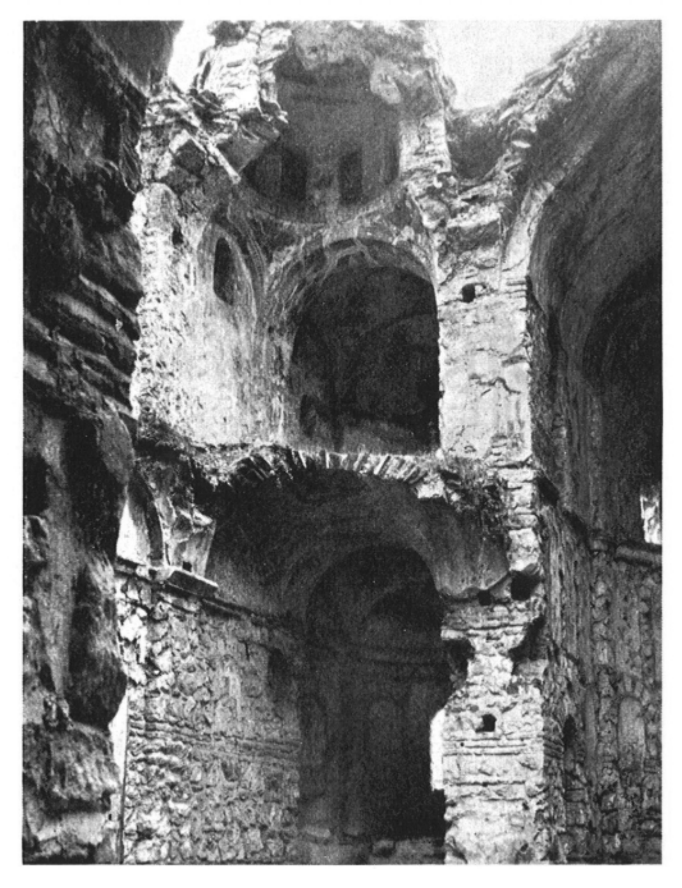


Pero, con seguridad, éste no es el caso. Más justo es suponer que solo los grandes machones soportan el peso; en este caso el suelo está localmente cargado con tensiones de 0,95 N/mm^2, suficientemente grandes como para dar lugar a asientos diferenciales. Realmente es aquí donde se encuentran las razones de las grietas en todas las bóvedas.

La construcción de la bóveda es firme y bien meditada. El gran óculo en la coronación tiene la ventaja de que reduce las tensiones de tracción y las desplaza hacia los arranques de la cúpula.

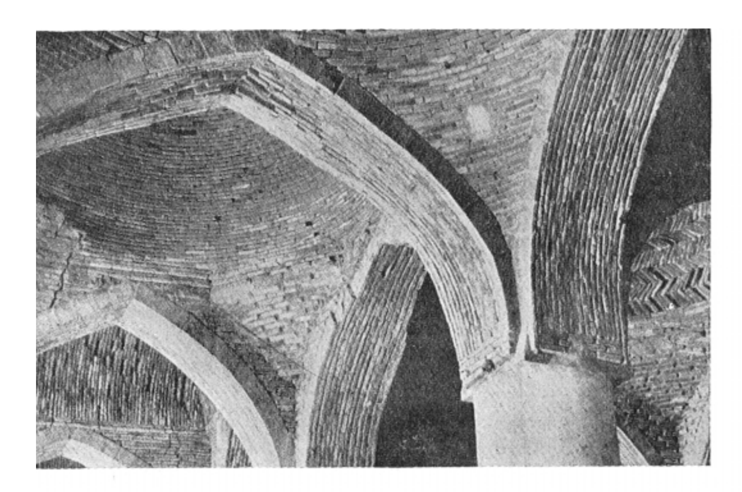
No obstante, las tensiones anulares de tracción podrían hacer surgir pequeñas grietas en los meridianos, con lo que los diferentes segmentos o lunas de la cúpula actuarían como partes separadas y, por tanto, ejercerían empujes. Sin embargo, por la parte exterior, la cúpula está fuertemente contrarrestada por una enorme masa de fábrica; además ha sido también trasdosada con fábrica. La cubierta de plomo fue colocada directamente encima, tal como los romanos hacían a menudo. El empuje fue neutralizado de forma concluyente.

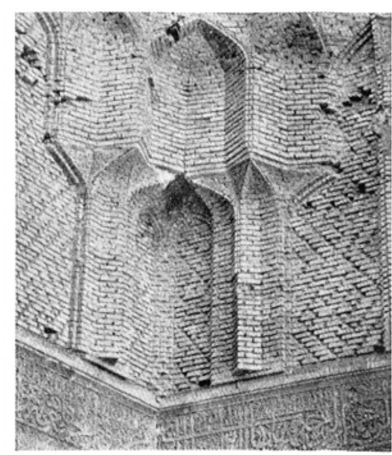
Una última palabra puede aún dedicarse a la extraordinaria armonía del interior. ¿Se debe ésta a las sencillas proporciones, dado el hecho de que la altura y la luz son iguales, de manera que una esfera se adapta perfectamente al interior? Es seguro que los romanos, con gran sentido por los efectos estéticos que se pretendían alcanzar, apreciaron este efecto. Una demostración la ofrece la geometría de los casetones, diferente en la parte de abajo y en la de arriba, diferencia que solo puede ser aclarada satisfactoriamente cuando se atiende a consideraciones estéticas, esto es a correcciones ópticas; pero una demostración aún mayor se encuentra en los bellos detalles, en la bien meditada disposición de nichos y columnas por los que el espacio adquiere «direccionalidad» y con los que la grandiosidad de la cúpula nos habla claramente; y, por último, en el espléndido efecto luminoso producido porque la luz proviene desde arriba, a través del óculo de nueve metros de diámetro colocado en la culminación de la cúpula.

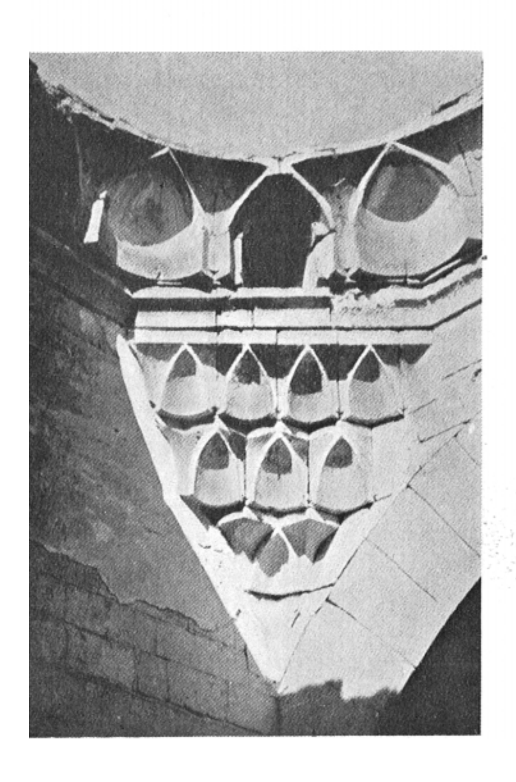


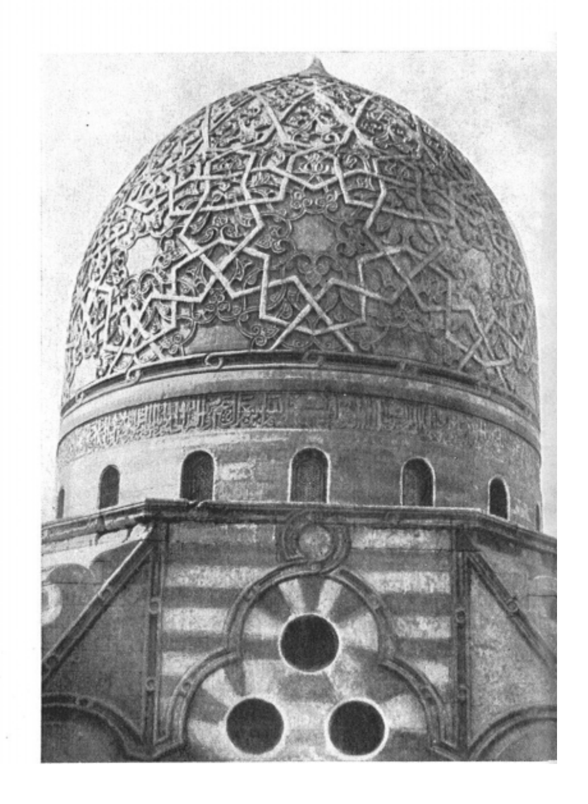
Arriba. Iglesia bizantina abovedada en Mistra (Grecia)

Abajo. Ruina de una iglesia bizantina cubierta con bóvedas en Brentochion (Grecia)









Arriba izquierda. Cúpulas persas sobre pechinas. Las hiladas de los arcos son diferentes a lo usual en Occidente

Arriba derecha. Forma de transición persa

Abajo izquierda. Forma de transición en una cúpula en Aleppo

Abajo derecha. Cúpula sobre una tumba califal en El Cairo

4.2 La construcción abovedada bizantina

En la arquitectura bizantina se reúnen gran número de influencias. Tanto los métodos de construcción griegos como los romanos de Occidente se mezclaron y asimilaron con construcciones abovedadas usuales en Asia Menor.

La arquitectura bizantina es notable por el extraordinario cuidado que se puso en una ejecución de buena calidad. El arte bizantino tuvo un elemento principal, *la bóveda* y para el arquitecto es un instructivo placer admirar el metódico carácter de los constructores y cómo supieron llevar a gran perfección sus ingeniosas y racionales creaciones.

Diferencia entre el método occidental y el oriental

Hay una gran diferencia entre la manera de abovedar en el Imperio Romano de Occidente y en el de Oriente. En el Imperio de Occidente la construcción estuvo subordinada al trabajo manual, a una meditada, inteligente, manera de trabajar en la que se podían emplear muchas manos y abundancia de materiales para conseguir una construcción resistente.

En el Imperio de Oriente, hay mucho más cálculo y combinación. A cada elemento de la bóveda se le dio, con sus elementos de apoyo, la forma más adecuada a su objetivo; cada parte recibió su lugar y forma determinada. El empuje ejercido por las bóvedas fue absorbido y neutralizado por el resto de la fábrica. En la construcción del edificio esto se tuvo totalmente en cuenta; se buscó tanto el equilibrio de las masas como sus relaciones armónicas (Lám. 35).

Los constructores de Oriente tenían buen ojo para las posibles tensiones actuantes y tomaron precauciones para eludir los asientos que dichas tensiones pudieran causar mediante una sabia y ordenada disposición de los edificios.

En la manera de construir del occidente romano es necesaria la cimbra de apoyo; los bizantinos abovedaron al aire, sin cimbras, método que, por cierto, surgió en Oriente y ya había sido empleado durante siglos por asirios, persas y egipcios (Lám. 28, fig. 5). No se puede averiguar con seguridad hasta cuando se remonta la construcción de bóvedas. En Egipto ya se cubrieron con cúpulas edificios trazados sobre planta cuadrada en los años 3700–3500 antes de Cristo.

Para el origen de las bóvedas de fábrica hay que tener en consideración dos periodos previos, el de las cabañas, levantadas con cañas o mimbres, y el de las

cavernas. Realmente, se debe dar la prioridad al edificio redondo con cubierta en cúpula, aunque la casa cuadrada con cúpula ya existía en tiempos prehistóricos. En Egipto hubo desde los tiempos antiguos pequeñas construcciones redondas cubiertas con cúpulas de barro usadas como almacenes de bienes o alimentos.

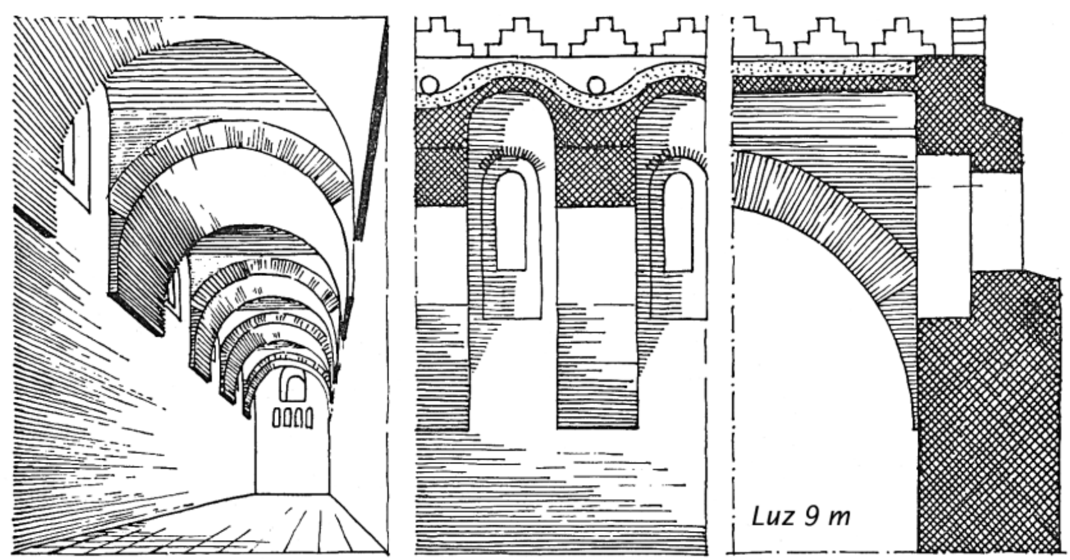
Las bóvedas de cañón pueden haber tenido un precedente en edificaciones de madera en las que se hicieran arcos de refuerzo o nervios de madera de palma sobre los que se colocarían esteras de caña. Sin embargo la bóveda de cañón juega un papel secundario; la principal aportación de la construcción abovedada fue la proporcionada por cúpulas sobre elementos volados o pechinas, tendidas sobre una planta cuadrada.

La cúpula fue en Asia Menor un elemento completamente usual en la construcción de viviendas; los vanos son normalmente de tres a cuatro metros y se ponen, si hace falta, varias cúpulas seguidas que se hacen descansar en arcos (Lám. 36, fig. 1; Lám. 46, fig. 1).

El célebre arqueólogo Victor Place vio en uno de sus viajes de estudio por Asia Menor a un grupo de niños trabajando en el abovedado de un recinto, siguiendo de forma aplicada las indicaciones de los albañiles experimentados:

> Se manda subir a algunos niños de doce a catorce años sobre unos muros que sirven como arranque a la bóveda; después estos pequeños obreros, con ayuda de cuerdas, izan espuertas conteniendo mortero y ladrillos y, bajo la dirección de un maestro albañil que les da órdenes desde abajo, comienzan a poner la primera hilada de la bóveda sobre el muro. Continúan el trabajo hasta donde sus brazos pueden alcanzar, esto es, unos 1,40 m y dejan secar esta porción durante dos horas. Esta parte queda en vuelo sobre el espacio interior. Cuando reanudan el trabajo, se tienden a lo largo sobre la parte ya hecha, se les da mortero y ladrillos y los jóvenes trabajadores la van haciendo hacia delante y, a medida que la bóveda progresa en el espacio, avanzan trepando sobre su trasdós. La única precaución que toman es dejar secar la parte recién ejecutada durante algunas horas. Y realmente los niños, de los cuales un grupo comenzó por la derecha y otro por la izquierda, van avanzando y desplazándose sobre el espacio de manera que construyen en vuelo y finalizan encontrándose en la coronación, en donde colocan como clave, o más bien ladrillos-clave, una hilera algo más gruesa de ladrillos. (Place 1867, 1, 246)

LÁMINA 28. MÉTODOS DE ABOVEDADO ORIENTALES. TRAZADO GEOMÉTRICO DE UNA CÚPULA PERSA



1. Interior del palacio Tag Eivan. 2. Sección longitudinal. 3. Sección transversal.
Construcción del último periodo sasánida (226-640, Mesopotamia).

5. Ejecución de la bóveda de cañón sin uso de cimbras.

6. Trazado geométrico de la cúpula del palacio de Sarvistán. El módulo es el triángulo con lados en proporción 3:4:5. La cúpula de fábrica de ladrillos de 27 x 27 x 8 cm. (1-6 según J. Dieulafoy).

4. Vista interior de la cúpula. 4ª. Planta.
Los muros con trompas realizados en mampostería, la cúpula de ladrillo.

El maestro albañil aclaró a los admirados espectadores que en Mosul se hacían bóvedas de esta forma desde tiempos inmemoriales.

Otro arqueólogo, E. O'Donovan (1882, 1, 477), cita también cosas interesantes sobre la construcción de una cúpula sobre una casa que vio hacer en el camino entre Kuchan y Meshed. No se utilizó cimbra. El albañil se pone en cuclillas en el borde de los gruesos muros, que habían formado un recinto cuadrado. En cuanto se alcanza la altura deseada, deja un círculo de ladrillos planos sin cocer sobre los muros usando un barro semifluido, muy pastoso, como adherente. Continúa su trabajo con hiladas del mismo material, cada una poco más volada, hasta lo más alto, donde la cúpula se cierra acuñando algunos trozos de ladrillos que hacen de clave. La parte exterior se deja lisa revistiéndola de barro. Dado que las hiladas más bajas adquieren pronto la forma adecuada, el constructor puede descansar sobre ellas y encontrar apoyo según va subiendo.

Las cubiertas así realizadas son fuertes e impermeables a la lluvia. De esta manera se construyen viviendas que en aspecto y significado destacan sobre las casas normales de los campesinos. Los ganaderos persas construyen sus establos de esta manera.

También Diez (1901) vio hacer cúpulas de la forma descrita sobre una planta cuadrada, pero con los ladrillos no dispuestos en anillos sino en líneas rectas como en una bóveda en rincón de claustro. La arista aparece entonces en las diagonales.

Las bóvedas de ladrillos crudos sin cocer son, a consecuencia de la plasticidad del material, más fáciles de hacer que las de ladrillos cocidos. En las ciudades persas del desierto se pueden ver diferentes variantes. Nada es imposible para ésta técnica; se puede decir con toda razón que aquí el arte del abovedado vive en el pueblo (Lám. 36).

El material

Para la construcción de bóvedas se prefirió el ladrillo cocido a la piedra. La longitud de los ladrillos alcanzó de 0,30 a 0,45 m, el espesor de 0,04 a 0,06 m y su calidad fue extraordinaria. Las juntas gruesas y el mortero granuloso hacen pensar en un hormigón preparado con arena gruesa.

La mejor cal se obtenía quemando restos de mármol; cuando éstos resultaban demasiado caros, se tomaba como materia prima otras clases de caliza menos costosas. Los romanos habían organizado a los trabajadores de los hornos de caliza en corporaciones en diversos centros del imperio. En Bizancio éste sigue siendo el caso, según Choisy, hasta la actualidad. También se ha mantenido en oriente la prescripción, que según Plinio ya existió en la antigua Roma, de que la cal al menos se tenía que dejar reposar tres años.

La cal era algo hidráulica de manera que, apagada con un poco de agua, suministraba una buena cal en polvo. Puesto que la cal se mezclaba con fragmentos de ladrillos machacados de aproximadamente 1,5 mm la capacidad hidráulica disminuía. En la construcción con bloques pesados, por ejemplo para la ejecución de bóvedas de piedra, se añadía piedra molida al mortero; cuanto más pesadas las piedras más tosca se hacía la composición del mortero.

Además de ladrillos y piedras se emplearon también para la construcción tejas curvas y vasijas o tubos huecos (incluso cocidos especialmente para este uso). Los ejemplos más conocidos son el Baptisterio y San Vital ambos en Rávena (Lám. 33, figs. 1 y 3). La cúpula de San Vital se realizó con una suerte de pequeños tubos huecos de drenaje; hasta los dos quintos de la altura estos tubos están en vertical, en tres filas unos junto a otros; son de aproximadamente 20 cm de longitud y tienen un diámetro de 5 cm. Sobre las piezas colocadas en vertical va una doble fila en espiral ascendente, de manera que la cúpula es muy ligera y a la vez resistente, pues los tubos se rodeaban con mortero que se adhería con gran fuerza a las ranuras con las que habían sido cocidos. El arranque de la cúpula estaba reforzado con una fábrica en la que se colocaban grandes vasijas, realmente cántaros de vino; éstos tenían una longitud de 55 cm y un grosor medio de 20 cm. Al igual que las vasijas para vino romanas, terminaban por debajo en punta y tenían asas hacia la mitad.

La ejecución de arcos y bóvedas

En los arcos de piedra no se cortaban las piedras en forma de cuña sino que eran las juntas las que se hacían oblicuas. Estas juntas se dividían en su espesor colocando entre ellas uno o más ladrillos (Lám. 30, figs. 2, 3). También se rellenaron con frecuencia las juntas con trozos de tejas curvas; de esta manera, se reducía la retracción (Lám. 30, fig. 4). Cuando una bóveda topaba con un arco se tomaban

medidas para evitar que la bóveda sufriera daños por causa de asientos diferenciales (Lám. 30, figs. 11, 12).

Si un arco recibía la carga de un pesado muro, se hacía sobre este muro un segundo arco compuesto por piezas de mayor tamaño. Puesto que el número de juntas del segundo arco era menor que el del primero, también era menor la retracción, de manera que la carga era absorbida casi totalmente por el arco superior.

Pero en general no se daban por satisfechos con ello. Preferentemente, la bóveda se hacía independiente del arco, de forma que una bóveda y un arco podían simplemente adosarse una al lado del otro. La construcción de arcos se hacía a veces de una forma análoga a la manera usual entre nosotros. Se colocaba debajo de él una cimbra y se trazaban las juntas hacia el centro del arco. Pero la mayoría de las veces se optaba por colocar los ladrillos con menor inclinación, con lo que se podían cubrir grandes vanos sin pesadas cimbras; la dirección de las juntas se dirigía en este caso hacia los arranques del arco (Lám. 30, fig. 9).

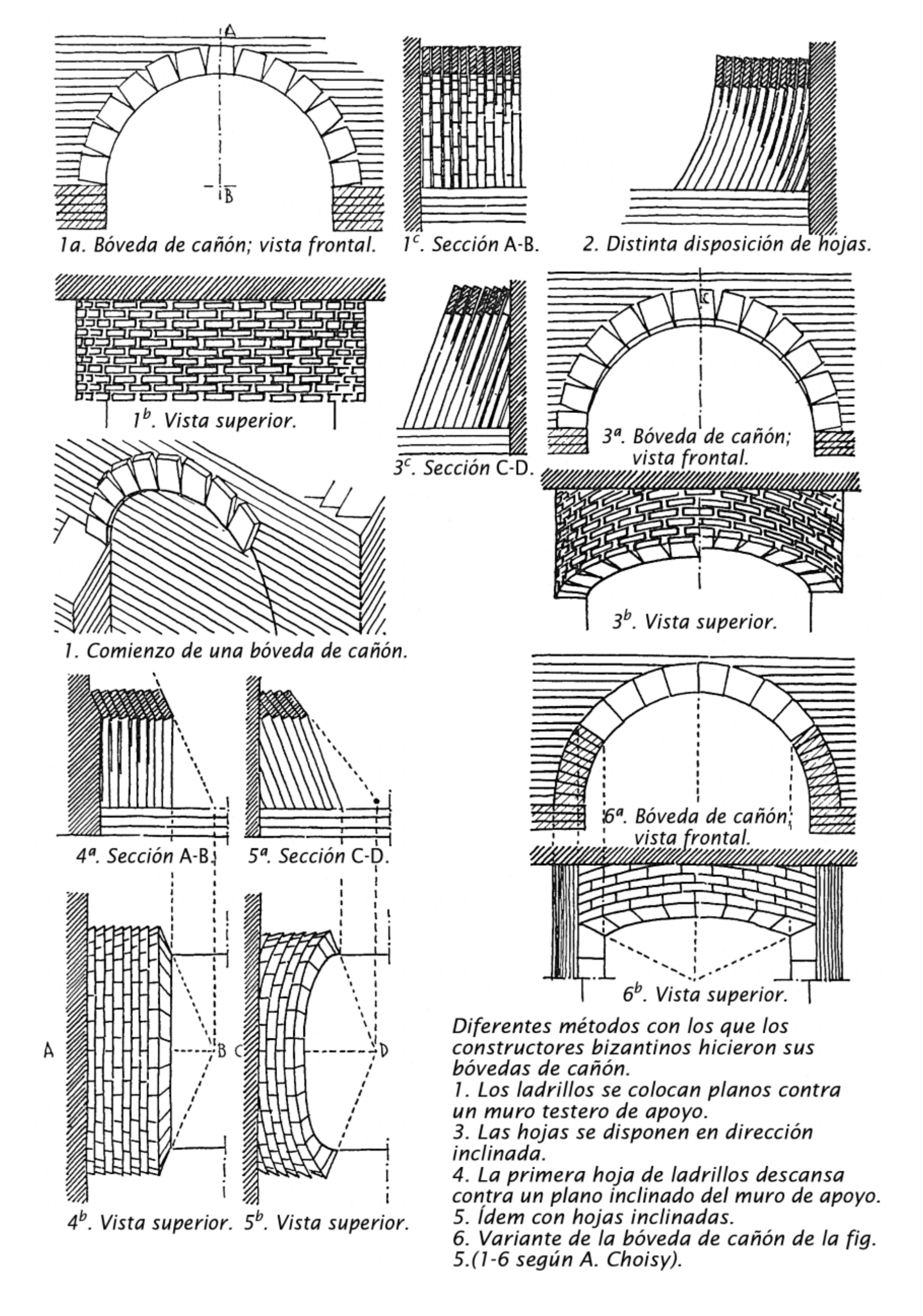
En el encuentro de las piezas en la coronación del arco aparecía entonces un problema ya que el cierre del arco debía realizarse con ladrillos dispuestos en capas bastante planas. La mayoría de las veces éstas se hacían en hiladas horizontales o en aparejo en espina de pez.

El arco se podía comenzar por los dos lados a la vez; la mayoría de las veces se trabajaba también igualmente en los dos lados en la construcción de bóvedas (Lám. 30, figs. 17, 18). Había libertad en las direcciones en las que se podían colocar los ladrillos; a menudo se procedía de tal manera que aparecía un aspecto decorativo en las bóvedas. Se disponía por consiguiente de un método de ejecución flexible y práctico en el que los ladrillos se mantenían en equilibrio por la adherencia del mortero.

Los bizantinos desarrollaron un método de abovedar mediante una bien meditado uso del ladrillo como material base y en el que se podía prescindir de las cimbras casi en la totalidad (Lám. 29).

Los ladrillos se asentaban poniendo en contacto sus lados planos entre sí, de forma que la fuerza de adhesión del abundante mortero los mantenía en su posición, un método que era de uso general en Asia Menor. Además, a veces se daba a los ladrillos una inclinación, digamos una falsa oblicuidad, de manera

LÁMINA 29. BÓVEDAS DE CAÑON BIZANTINAS



Diferentes métodos con los que los constructores bizantinos hicieron sus bóvedas de cañón.
1. Los ladrillos se colocan planos contra un muro testero de apoyo.
3. Las hojas se disponen en dirección inclinada.
4. La primera hoja de ladrillos descansa contra un plano inclinado del muro de apoyo.
5. Ídem con hojas inclinadas.
6. Variante de la bóveda de cañón de la fig. 5.(1-6 según A. Choisy).

que venían a situarse oblicuos sobre el plano perpendicular al eje de la bóveda. Gracias a ello no se era tan dependiente de la fuerza de adherencia del mortero. A veces incluso se daba una ligera curvatura a las hiladas para que trabaran todavía mejor.

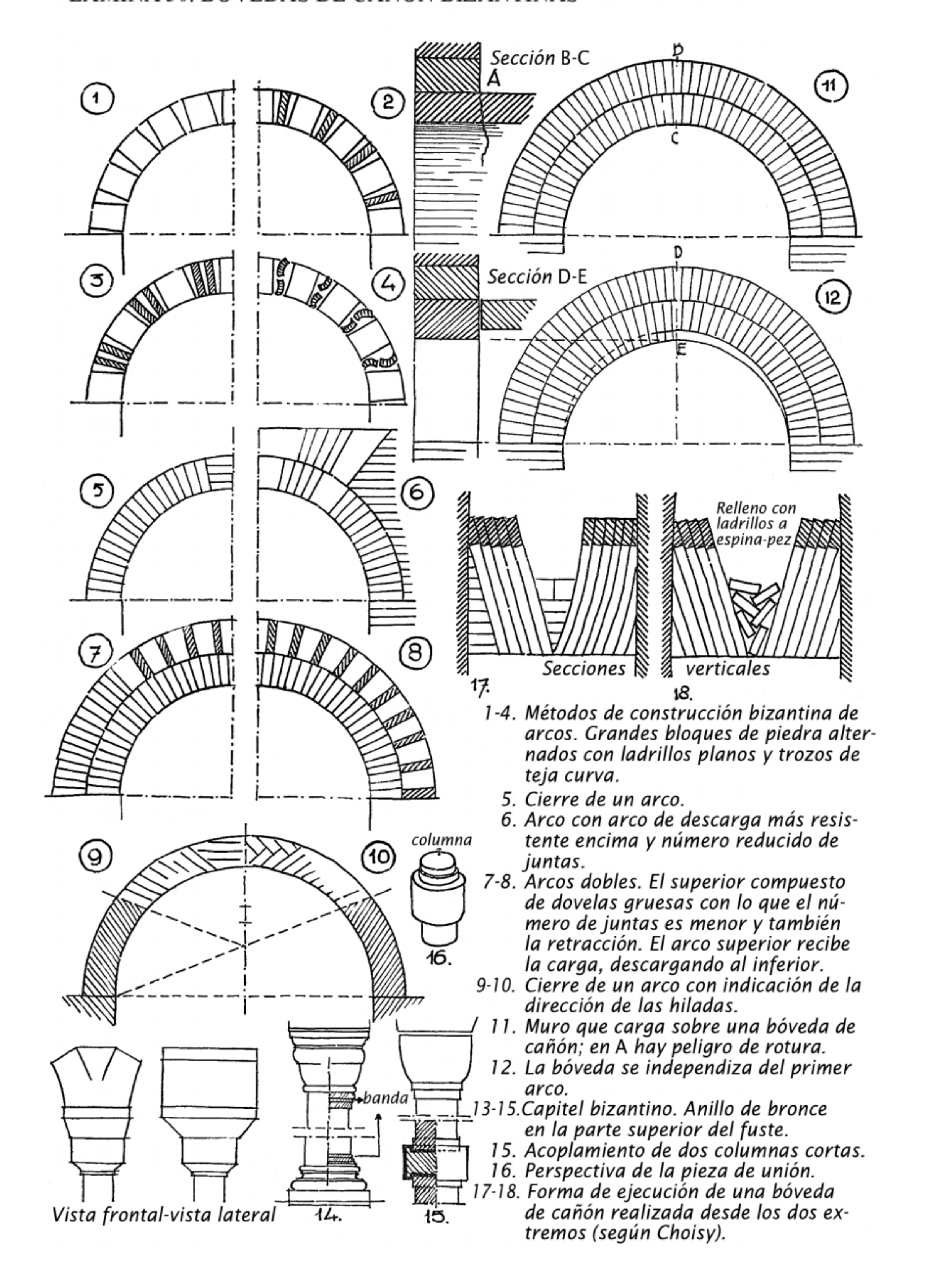
También se usaron combinaciones de estas diferentes formas. Se puso gran atención en el detalle. Si los arcos se tenían que apoyar en columnas entonces el capitel se ensanchaba por la parte de arriba; a veces se colocó un segundo capitel por encima, con lo que se aumentó la probabilidad de que la compresión fuera centrada (Lám. 30, figs. 13-15).

El fuste de las columnas se hacía monolítico, de piedra dura y de buena calidad, pero dado que éstas a veces tenían que ser de gran longitud se ponían a contralecho, lo que conllevaba el peligro de que surgieran grietas verticales. Por la experiencia de la construcción de Santa Sofía de Constantinopla se vio que los monolitos empleados tendían a agrietarse. Este peligro se disminuyó colocando zunchos de bronce en la base y parte superior de la columna, que servían tanto de ornamento como de refuerzo (Lám. 30, fig. 14). No obstante, en la medida de lo posible, se buscaba que las piedras se colocaran a lecho. Entonces se recurría a hacer columnas compuestas formadas por tramos más cortos a contralecho colocados unos encima de otros y unidos por un fuerte anillo de piedra sentado a lecho (Lám. 30, figs. 15, 16). Para asegurar un reparto uniforme de la compresión, entre las diferentes partes se ponían planchas de plomo.

Las diferentes clases de bóvedas bizantinas

En Bizancio se conocieron tanto los métodos de construcción romanos como los orientales, pero los inteligentes griegos no se contentaron con una aplicación sin más de lo ya sabido. Las pesadas bóvedas romanas cuya construcción estaba basada en la abundancia de material y mano de obra les satisficieron incluso menos que las bóvedas de cañón y en rincón de claustro de Asia Menor. Tomaron prestadas de los romanos la bóveda de arista y de Oriente la cúpula, en la que un rasgo romano a tener en cuenta es la colocación de nervios, pero las elaboraron como nuevas creaciones basadas en los métodos orientales para, en la medida de lo posible, ejecutarlas sin cimbras.

LÁMINA 30. BÓVEDAS DE CAÑÓN BIZANTINAS



1-4. Métodos de construcción bizantina de arcos. Grandes bloques de piedra alternados con ladrillos planos y trozos de teja curva.
5. Cierre de un arco.
6. Arco con arco de descarga más resistente encima y número reducido de juntas.
7-8. Arcos dobles. El superior compuesto de dovelas gruesas con lo que el número de juntas es menor y también la retracción. El arco superior recibe la carga, descargando al inferior.
9-10. Cierre de un arco con indicación de la dirección de las hiladas.
11. Muro que carga sobre una bóveda de cañón; en A hay peligro de rotura.
12. La bóveda se independiza del primer arco.
13-15. Capitel bizantino. Anillo de bronce en la parte superior del fuste.
15. Acoplamiento de dos columnas cortas.
16. Perspectiva de la pieza de unión.
17-18. Forma de ejecución de una bóveda de cañón realizada desde los dos extremos (según Choisy).

La bóveda de arista: La bóveda de arista proporciona ventajas en dos aspectos; primero, concentra los empujes en los puntos de apoyo y, en segundo lugar, permite al constructor colocar fácilmente huecos de iluminación. En Bizancio se empleó con profusión.

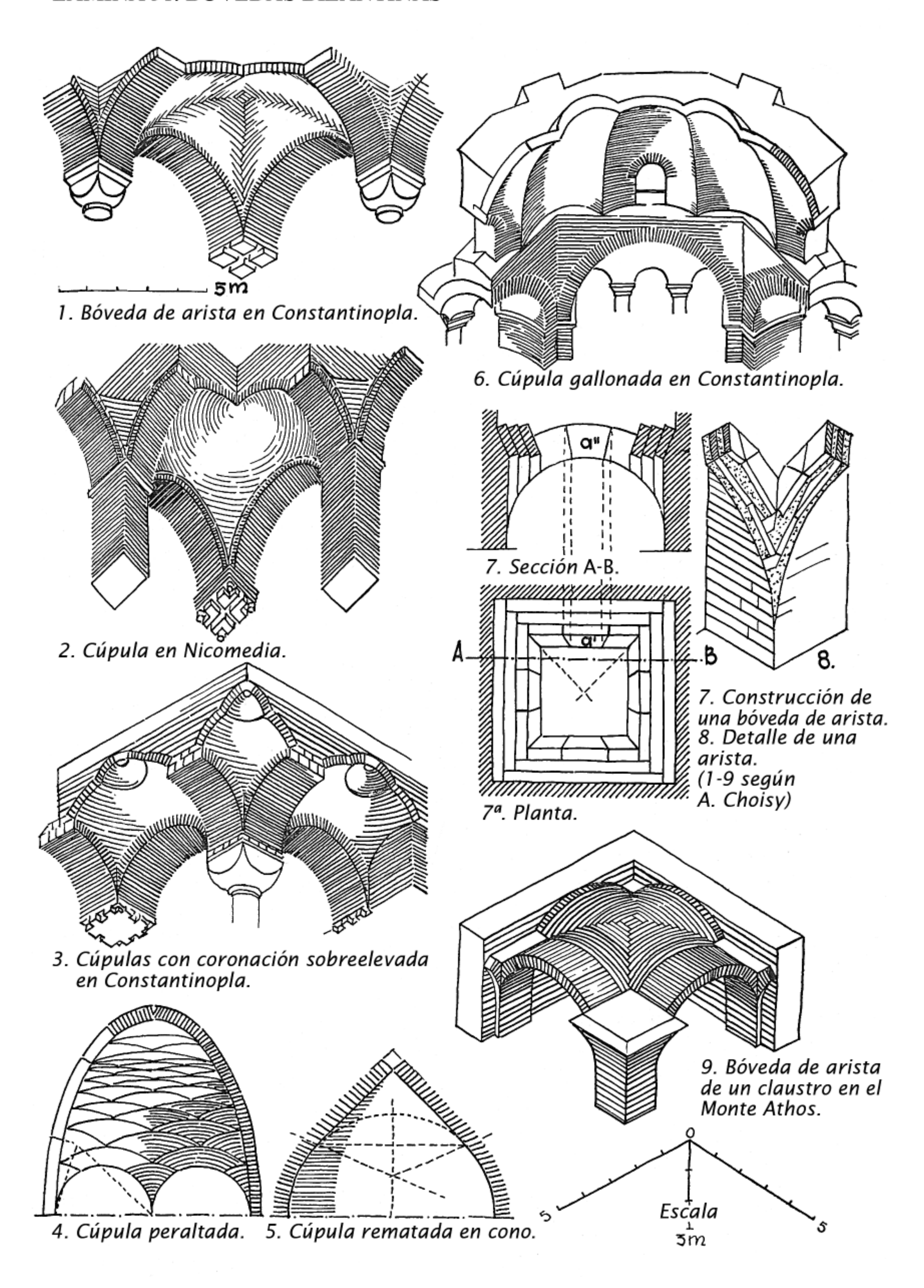
Es interesante la forma en que los bizantinos las hicieron sin cimbra.

La primera hoja de ladrillos que estaban en posición inclinada, se colocaba contra los arcos de cabeza, de forma que cada hoja encontraba apoyo contra la contigua y también contra el arco. A medida que se construían las hojas se formaban arcos cada vez con radio menor; éstos eran entonces ejecutados de la misma manera hasta que la bóveda estuviera completamente cerrada (Lám. 31, figs. 7, 7ª). La bóveda consta de dos partes de bóveda de cañón (surge por tanto de la intersección de dos bóvedas de este tipo) y posee líneas de clave rectas; su construcción está emparentada con la de una bóveda en rincón de claustro normal sobre una planta rectangular o cuadrada. Sin embargo, los arcos diagonales muestran en este caso aristas salientes y no entrantes. Estas aristas son naturalmente difíciles de realizar con canto vivo; se ejecutaban con gruesas juntas y los ladrillos eran toscamente cortados. Pero esto no era ningún inconveniente, ya que las bóvedas eran mayoritariamente revestidas.

En la parte inferior de la bóveda las aristas son más vivas que en la parte más alta, donde casi desaparecen. Los bizantinos supieron hacer las aristas también visibles en la parte de arriba dándoles un peralte arqueado. Las líneas de clave ya no eran horizontales sino curvadas, a veces en forma ojival, alzándose hacia el vértice de la bóveda. Esta bóveda de arista peraltada tenía la ventaja de que se eliminaban los pequeños asientos de la coronación.

Para facilitar la ejecución, los arcos de cabeza, los diagonales y, en general, todos los arcos que participaban en la determinación de la bóveda se hacían circulares. La situación del centro de los arcos dependía de la altura disponible de la bóveda. Si ésta era limitada, entonces dicho punto se situaba por debajo del arranque de los arcos; si por el contrario había altura libre, no se hacía una bóveda de arista sino que se prefería una bóveda vaída. Según Choisy éste fue el principal mérito de los constructores bizantinos, añadir esta bóveda, transmitida desde Asia Menor, a los tesoros del conocimiento constructivo. Sin embargo, sus hallazgos deben de tenerse también en muy alta consideración en relación a las construcciones de cúpulas.

LÁMINA 31. BOVEDAS BIZANTINAS



1. Bóveda de arista en Constantinopla.

2. Cúpula en Nicomedia.

3. Cúpulas con coronación sobreelevada en Constantinopla.

4. Cúpula peraltada.

5. Cúpula rematada en cono.

6. Cúpula gallonada en Constantinopla.

7. Sección A-B.

7ª. Planta.

7. Construcción de una bóveda de arista.
8. Detalle de una arista.
(1-9 según A. Choisy)

9. Bóveda de arista de un claustro en el Monte Athos.

La cúpula: El abovedado de una planta cuadrada mediante una cúpula, de tal forma que apoyara sobre rellenos en las esquinas de la forma más perfecta posible, se consiguió por el empleo de la pechina. Gracias a este segmento de bóveda esférica, la carga de la cúpula se repartió de la mejor manera posible sobre los arcos y, finalmente, sobre los pilares. El desarrollo de la pechina es difícil de seguir. En Santa Sofía vemos con asombro cómo se aplicó un sistema de bóvedas de un alto grado de perfección, en el que las pechinas forman la transición más visible de una planta cuadrada hacia una cúpula circular. Además, hay que señalar que la bella iluminación del espacio principal mediante una corona de huecos de luz colocada al inicio de la cúpula fue posible porque la cúpula, en vez de estar formada por una cáscara estaba constituida por nervios y rellenos (Lám. 35).

Sin embargo, la cúpula continua, esto es la cúpula de una cáscara completa, sin nervios de refuerzo, también fue ampliamente empleada por los bizantinos, sobre todo en los casos de bóvedas de reducido tamaño. Para su ejecución, normalmente, se emplearon en la parte inferior ladrillos considerablemente grandes en tamaño y peso, empleándose ladrillos más pequeños en la parte superior. Sin embargo, aún así, la ejecución de la fábrica era difícil ya que los ladrillos tendían a deslizar. Por ello no se dirigían los ladrillos hacia el centro, sino que se disponían en forma más plana. A veces se hacía el abovedado de la parte superior algo más peraltado, de manera que la cúpula constaba de dos partes con diferente radio de curvatura (Lám. 31, fig. 3). Los persas las realizaban simplemente continuando en forma recta, con lo que surgía una cúpula apuntada (Lám. 31, fig. 5). En cuanto a la colocación de las hiladas, ésta se hacía a veces independiente de la disposición concéntrica, obteniéndose efectos decorativos producidos por el juego en la disposición de los ladrillos (Lám. 31, fig. 4).

Si las cúpulas eran de grandes dimensiones entonces podían ejecutarse en forma de gajos, cúpulas gallonadas, pudiéndose construir cada uno de ellos sin cimbra y recibiendo un adecuado refuerzo por las aristas (Lám. 31, fig. 6). En la parte inferior de la cúpula se colocaban huecos para la iluminación del espacio, especialmente en la zona de las esquinas; pero también con frecuencia, en la totalidad del arranque, que apoyaba sobre una considerable masa de fábrica (Lám. 35, fig. 6).

Estas cúpulas gallonadas (en realidad bóvedas con aristas) han sido frecuentemente tomadas como ejemplo en la construcción de iglesias con cúpulas de los últimos treinta años en nuestro país.

Formas de transición: nichos esféricos, trompas, pechinas

La construcción de una cúpula exige, naturalmente, una planta circular o al menos un polígono regular como aproximación a la forma circular. Si se tiene que tender una cúpula sobre un cuadrado, entonces es obligatorio situar en los ángulos formas de transición, esto es, hacer que la cúpula continúe también en las esquinas.

Los bizantinos solían dar a cada parte de la construcción una base geométrica; si se dejaba continuar la cúpula por los ángulos entonces se elegía una bóveda esférica (bóveda sobre pechinas). De los muchos motivos de transición usados por los bizantinos, los más corrientes son los siguientes:

NICHO ESFÉRICO: Los nichos esféricos pueden ser de dos tipos (Lám. 32):

a) una semicúpula con una profundidad igual o algo mayor que su radio. Los ladrillos pueden colocarse en anillos de la misma forma que en la cúpula. Estos ladrillos se mantienen en equilibrio entre sí; es útil, no obstante, hacer un arco testero en la parte delantera, contra el que apoyan los ladrillos.
b) un segmento de cúpula, en el que la profundidad es menor que el radio. Puesto que en este caso los ladrillos podían ir en forma convergente desde el arco testero, la dirección de las hiladas se hacía en forma de abanico (Lám. 32, figs. 1, 2). Los bizantinos dieron soluciones muy interesantes para el corte de ladrillos. En la construcción románica y renacentista este motivo del nicho pasó por un nuevo desarrollo.

TROMPA: Si se trazan por los puntos A, B y C de un nicho dos planos AB y BC perpendiculares al suelo, la forma resultante es una trompa bizantina (Lám. 32, fig. 3). La trompa puede estar terminada por un arco testero. Los ladrillos se disponen en forma de abanico o en capas concéntricas como en una cúpula. Estas trompas no deben confundirse con las bóvedas en forma de abanico aplicadas también excepcionalmente por los bizantinos pero de las que, como motivos de transición, se sirvieron sobre todo los persas. Las trompas persas tienen forma de cono o constan de nichos con apoyos verticales y cerrados en forma de semicúpula.

PECHINA: Esta denominación se da a la parte de una superficie curva cuya proyección sobre una planta cuadrada, sobre la que se ha de levantar la cúpula, rellena el ángulo hasta el círculo inscrito (Lám. 32, fig. 7; Lám. 1, fig. 19).

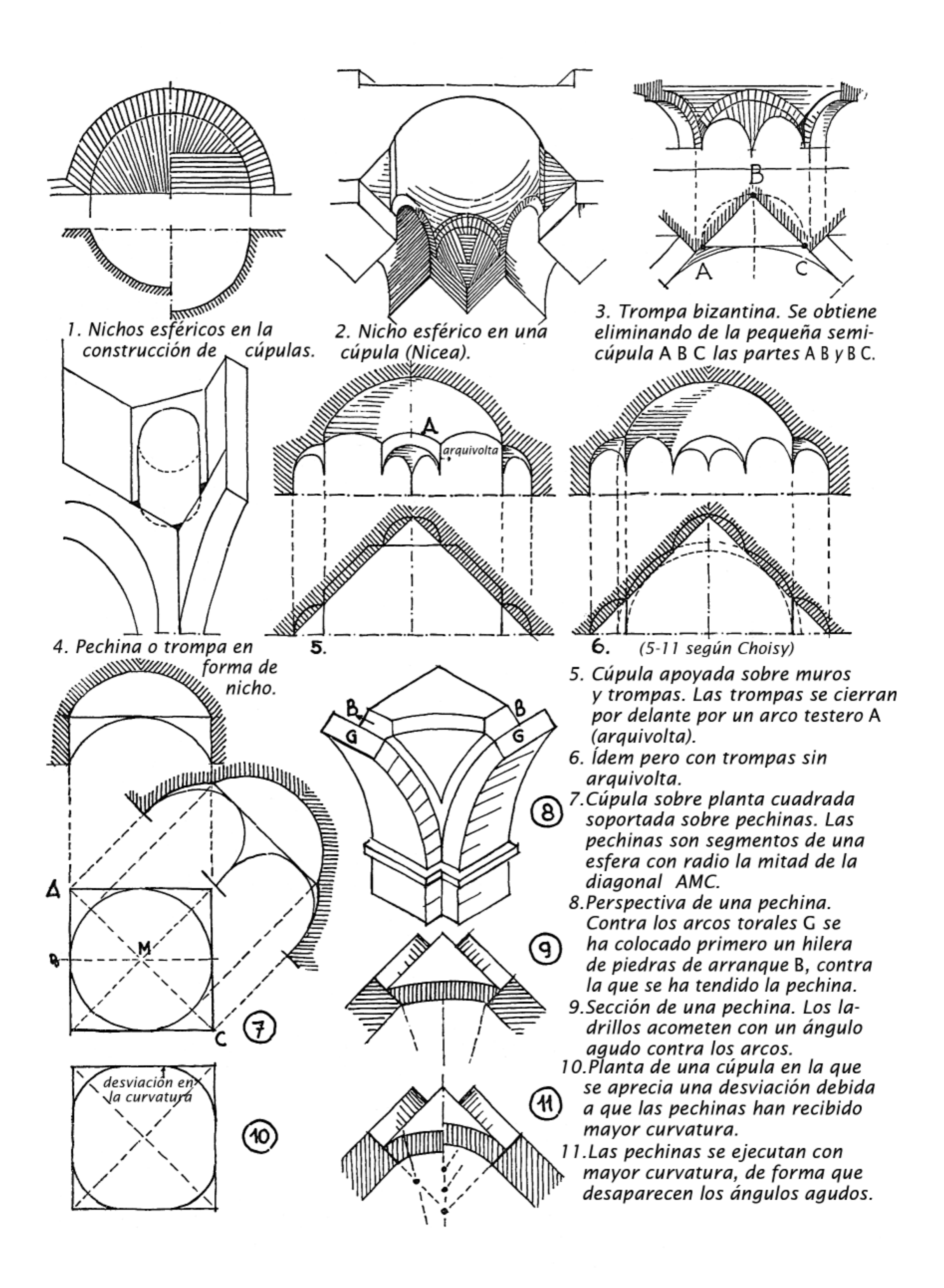
La opinión común es que para la pechina se tomaba una parte de la esfera circunscrita y para la cúpula la inscrita, surgiendo una clara transición entre ambas formas esféricas; sin embargo, los bizantinos se desviaron de esta solución, como se verá más adelante.

Normalmente, la pechina se rellanaba convenientemente por el trasdós (Lám. 32, fig. 8). Recibía el peso de la cúpula, y lo transmitía a los pilares torales de las esquinas. La carga de la pechina, bien se puede transmitir por su extremo inferior directamente a los pilares, o bien la pechina puede empujar lateralmente contra los arcos torales, de manera que parte de la carga se transmite de forma indirecta a los pilares.

En la construcción abovedada se ven también intentos por parte de los maestros constructores de hacer la pechina más centrada sobre los apoyos, de forma que los pilares reciban directamente una gran parte de su carga. Se da entonces, a los pilares una forma diferente que permite un apoyo directo de la pechina sobre parte de su sección. Ésto se puso en práctica en diversas iglesias de estilo bizantino. Un bello ejemplo lo suministra la basílica de San Pedro de Roma, en verdad una obra del Renacimiento, pero cuyo sistema de pechinas es realmente bizantino. En ella, los pilares tienen en planta, o si se quiere en sección horizontal, una forma en L mediante la cual el peso de la cúpula se reparte mejor sobre ellos (Lám. 35, fig. 4).

Para la colocación de las hiladas en la pechina se ponía a veces primero una banda de piedra entre los arcos entre los que descansaba la pechina, de forma que el relleno de ladrillo podía apoyar en ángulo recto contra ellos (Lám. 32, fig. 8). Si esta banda faltaba, los ladrillos acometían en ángulo agudo contra el arco. Esto conllevaba el peligro de rotura y también gran riesgo de que las hiladas pudieran deslizar. Por estas razones se cambió el abovedado de la pechina; se aumentó la curvatura en la zona del arranque contra el arco para que los ladrillos acometieran de nuevo en perpendicular. Los centros de las diferentes hiladas de la pechina se desplazan de lugar; el arqueado de la pechina ya no es igual al de la esfera circunscrita (Lám. 32, figs. 9, 11).

LÁMINA 32. FORMAS DE TRANSICIÓN BIZANTINAS



1. Nichos esféricos en la construcción de cúpulas.

2. Nicho esférico en una cúpula (Nicea).

3. Trompa bizantina. Se obtiene eliminando de la pequeña semi-cúpula A B C las partes A B y B C.

4. Pechina o trompa en forma de nicho.

(5-11 según Choisy)

5. Cúpula apoyada sobre muros y trompas. Las trompas se cierran por delante por un arco testero A (arquivolta).

6. Ídem pero con trompas sin arquivolta.

7. Cúpula sobre planta cuadrada soportada sobre pechinas. Las pechinas son segmentos de una esfera con radio la mitad de la diagonal AMC.

8. Perspectiva de una pechina. Contra los arcos torales G se ha colocado primero un hilera de piedras de arranque B, contra la que se ha tendido la pechina.

9. Sección de una pechina. Los ladrillos acometen con un ángulo agudo contra los arcos.

10. Planta de una cúpula en la que se aprecia una desviación debida a que las pechinas han recibido mayor curvatura.

11. Las pechinas se ejecutan con mayor curvatura, de forma que desaparecen los ángulos agudos.

LÁMINA 33. CÚPULAS BIZANTINAS Y DEL SUR DE FRANCIA

Detalle B

A *según Rivoira*

Espirales (ver 3)

vertical

36°

1. S. Vital en Rávena.

2. San Sergio y San Baco, Constantinopla.

2ª. Planta.

10m

1ª. Planta.

16.90

17cm

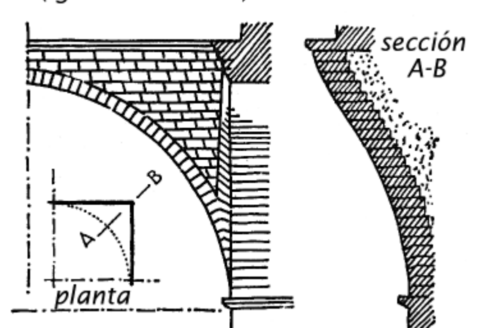
3. Tubos huecos y tejas curvas usadas en construcción de cúpulas. En fig. 1 las vasijas se disponen en un ángulo de hasta 36º con la vertical.

5ª

10m

4. Iglesia de Souillac, Francia (Iglesia románica).

5. Iglesia de S. Sofía en Trebisonda.



4ª. Pechina de la iglesia de Souillac (según Rey).

1. *La bóveda de San Vital fue realizada con tubos huecos en espiral ascendentes y encajados entre sí. La cúpula fue contrarrestada mediante nichos.*
2. *Cúpula con forma típica de gajos. Contrarresto por nichos y bóvedas de cañón.*
4. *Cúpulas colocadas una tras otra que forman una nave.*
5. *La cúpula está sobre un tambor. Los arcos sobre los que apoyan las pechinas fueron contrarrestados por bóvedas de cañón. (1,2,3,5 según Holtzinger).*

Resulta evidente que este tipo de ajustes geométricos distorsionaron la planta circular de la cúpula (Lám. 32, fig. 10). Pero también tuvo que ver con dicha deformación la manera en que se ejecutaba la pechina. Se tendía sin cimbra que controlara la dirección y los arranques de las hiladas de ladrillo se unían a sentimiento unos con otros en cada una de ellas, obteniéndose una superficie que no necesariamente tenía que ser una parte de una esfera. Las pechinas colocadas entre arcos apuntados tomaban incluso una sección ojival (Lám. 33, fig. 4ª). Dando a la cúpula una forma gallonada, esto es, conjuntando distintos sectores curvados unos junto a otros, esta deformación quedaba más o menos disimulada.

Equilibrio de las bóvedas. Atirantados

Los bizantinos tuvieron una fina percepción de los asientos que podían sufrir las construcciones. Con cargas desiguales, rápidamente aparecen asientos; un ejemplo de esto lo vimos ya en la descripción de la unión entre una bóveda de cañón y un arco fuertemente cargado. Se ha de tener en cuenta, por tanto, que las partes de la construcción que reciben una gran carga se separan de otras que reciben menos carga.

El empuje lateral de las bóvedas puede ser absorbido de diferentes maneras a efectos de su neutralización.

El primer método consiste en la colocación de contrafuertes contra el edificio; este método llegó a desarrollarse plenamente sobre todo en la arquitectura medieval occidental (Lám. 34, fig. 1).

En el segundo método los contrafuertes se colocan en la parte interior de los muros de forma que quedan protegidos contra los agentes atmosféricos. En Oriente, en Bizancio, se aplicó este método, que años más tarde se seguiría en el Renacimiento Italiano (Lám. 34, fig. 2). No obstante, en general, se prefirió conseguir el contrarresto sin contrafuertes, apoyando partes de la construcción unas contra otras de manera que en el edificio mismo se neutralicen los sistemas de empujes y contraempujes evitando el peligro de hundimiento (Lám. 34, fig. 3–7).

En la construcción de cúpulas, el empuje lateral, que en cúpulas sin nervios de refuerzo puede ser máximo en la base, se absorbía colocando contra ellas otra bóveda, bien de tipo semicúpula o bien bóveda de cañón. Además, y actuando de

forma muy juiciosa, se emplearon también atirantados como refuerzo de la estabilidad (Lám. 34, fig. 11). Obviamente se temían mucho las consecuencias negativas de la oxidación del hierro en las construcciones de piedra. En la ejecución de los muros se usó, por tanto, poco hierro; en las bóvedas nada.

Los constructores tuvieron en cuenta que también podían surgir roturas en las bóvedas por pequeños asientos si los ladrillos estaban fijamente trabados entre sí, ya que entonces las bóvedas pierden la capacidad de encontrar la forma más favorable durante el endurecido del mortero. En cualquier caso, emplearon los mencionados tirantes de anclaje, tanto más cuanto que en Oriente son frecuentes los terremotos.

La mayoría de las veces, los tirantes se hacían de madera. Las bóvedas se trasdosaban y contrarrestaban pero, además, los arranques se unían con vigas de madera con los muros elevados sobre ellos. Éstas vigas se colocaban bien a la altura del arranque, con lo que quedaban parcialmente a la vista, o bien por encima de la bóveda, empotrándose en el espesor de los muros. Los muros se reforzaban colocando en ellos vigas de madera de roble separadas entre sí aproximadamente dos metros. Tales vigas se usaban también para contrarrestar el empuje; si servían como anclaje contra el empuje adoptaban una sección algo mayor. Durante la ejecución los constructores emplearon mucho tirantes temporales que eliminaban cuando la obra había finalmente asentado.

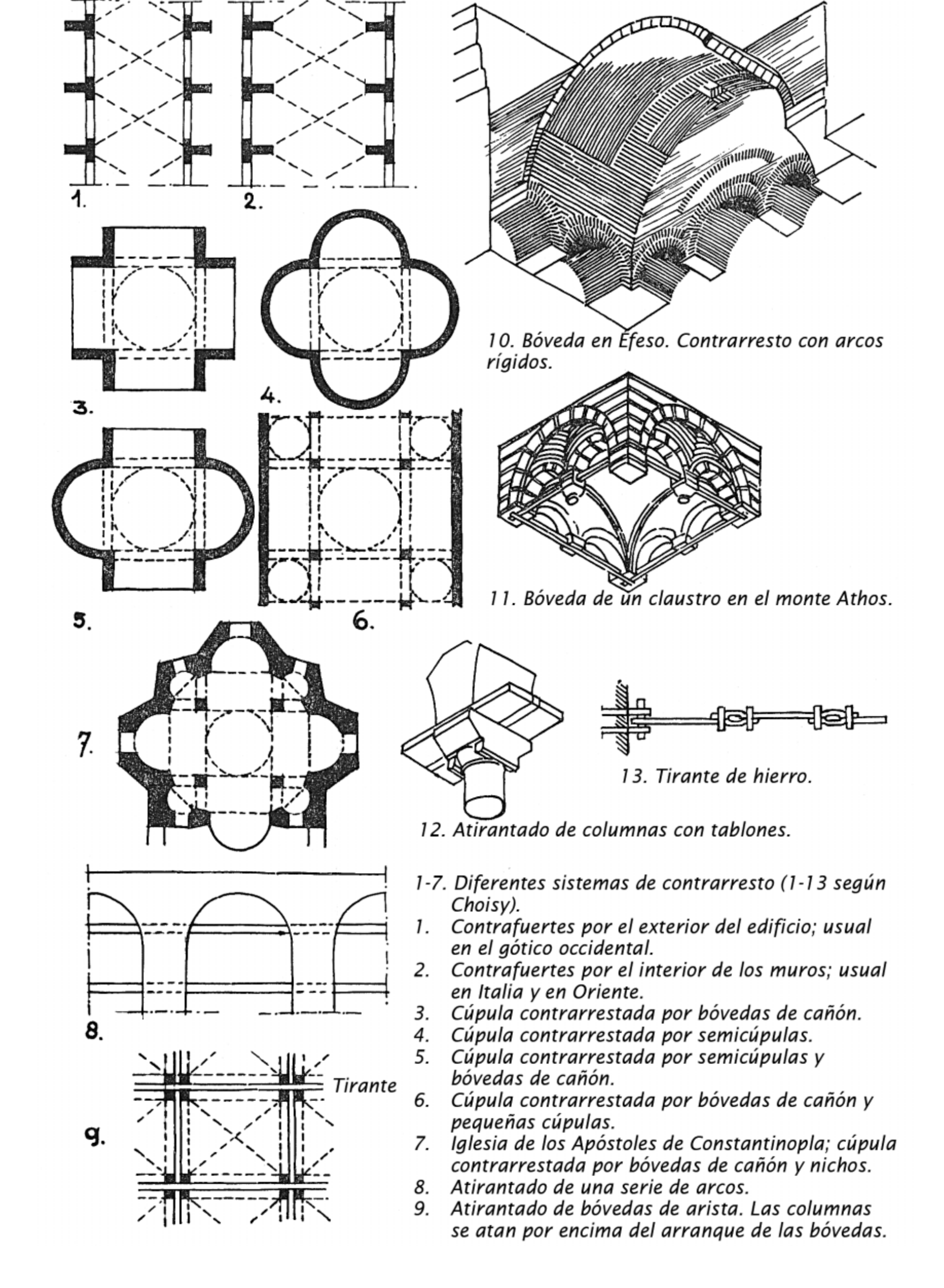
Habían aprendido por experiencia cómo actuar en cada caso particular. A veces las columnas se unían mediante pesados tablones pasantes colocados sobre los capiteles (Lám. 34, fig. 12).

Los muros bajo las grandes cúpulas, así como los apoyos verticales (los tambores), se reforzaban también con pesadas vigas en el arranque de los arcos; estas vigas, si era el caso, traspasaban los huecos de iluminación. Estos tirantes fueron primeramente eliminados cuando se estaba seguro de que los asientos habían terminado completamente, pero cuando se podía se los dejaba. Los tirantes cumplieron bien su función, sobre todo los colocados uniendo los arcos y las ventanas.

Se hacía una diferenciación entre atirantados temporales y permanentes; estos últimos se trabajaban y esculpían con gran belleza, los primeros apenas se escuadraban.

Así son por ejemplo las vigas codales de Santa Sofía, destinadas a resistir empujes de forma permanente, que estaban ricamente decoradas (Lám. 35, fig. 5).

LÁMINA 34. SISTEMAS BIZANTINOS DE CONTRARRESTO Y ATIRANTADO



10. Bóveda en Éfeso. Contrarresto con arcos rígidos.

11. Bóveda de un claustro en el monte Athos.

12. Atirantado de columnas con tablones.

13. Tirante de hierro.

1-7. Diferentes sistemas de contrarresto (1-13 según Choisy).

1. Contrafuertes por el exterior del edificio; usual en el gótico occidental.
2. Contrafuertes por el interior de los muros; usual en Italia y en Oriente.
3. Cúpula contrarrestada por bóvedas de cañón.
4. Cúpula contrarrestada por semicúpulas.
5. Cúpula contrarrestada por semicúpulas y bóvedas de cañón.
6. Cúpula contrarrestada por bóvedas de cañón y pequeñas cúpulas.
7. Iglesia de los Apóstoles de Constantinopla; cúpula contrarrestada por bóvedas de cañón y nichos.
8. Atirantado de una serie de arcos.
9. Atirantado de bóvedas de arista. Las columnas se atan por encima del arranque de las bóvedas.

Cuando en la construcción de esta iglesia se retiraron los tirantes, las bóvedas, que aún no habían fraguado por completo, cedieron y se agrietaron, de manera que hubo que colocar precipitadamente nuevos tirantes de hierro. Puesto que también se emplearon atirantados de hierro se tuvieron que tomar especiales cuidados para protegerlos de la oxidación.

Entre otras, se usaron también tirantes de hierro en San Marcos de Venecia. Los árabes no fueron contrarios a esta aplicación y los emplearon abundantemente en la construcción de las grandes mezquitas de Constantinopla. La mayoría de las veces dejaron los tirantes puestos incluso cuando las bóvedas ya habían fraguado. Por experiencia sabían que una bóveda «nunca duerme», que circunstancias imprevistas como asientos en el subsuelo o temblores de tierra podían tener graves consecuencias para la estabilidad. En consecuencia, asumieron el peligro que la oxidación del hierro conllevaba sobre una construcción demasiado blanda y elástica. Actualmente, con el uso de morteros de cemento el peligro de oxidación ha disminuido algo, pero los constructores precavidos bien harán en preferir elaborar los tirantes de las cúpulas con acero inoxidable o bronce.

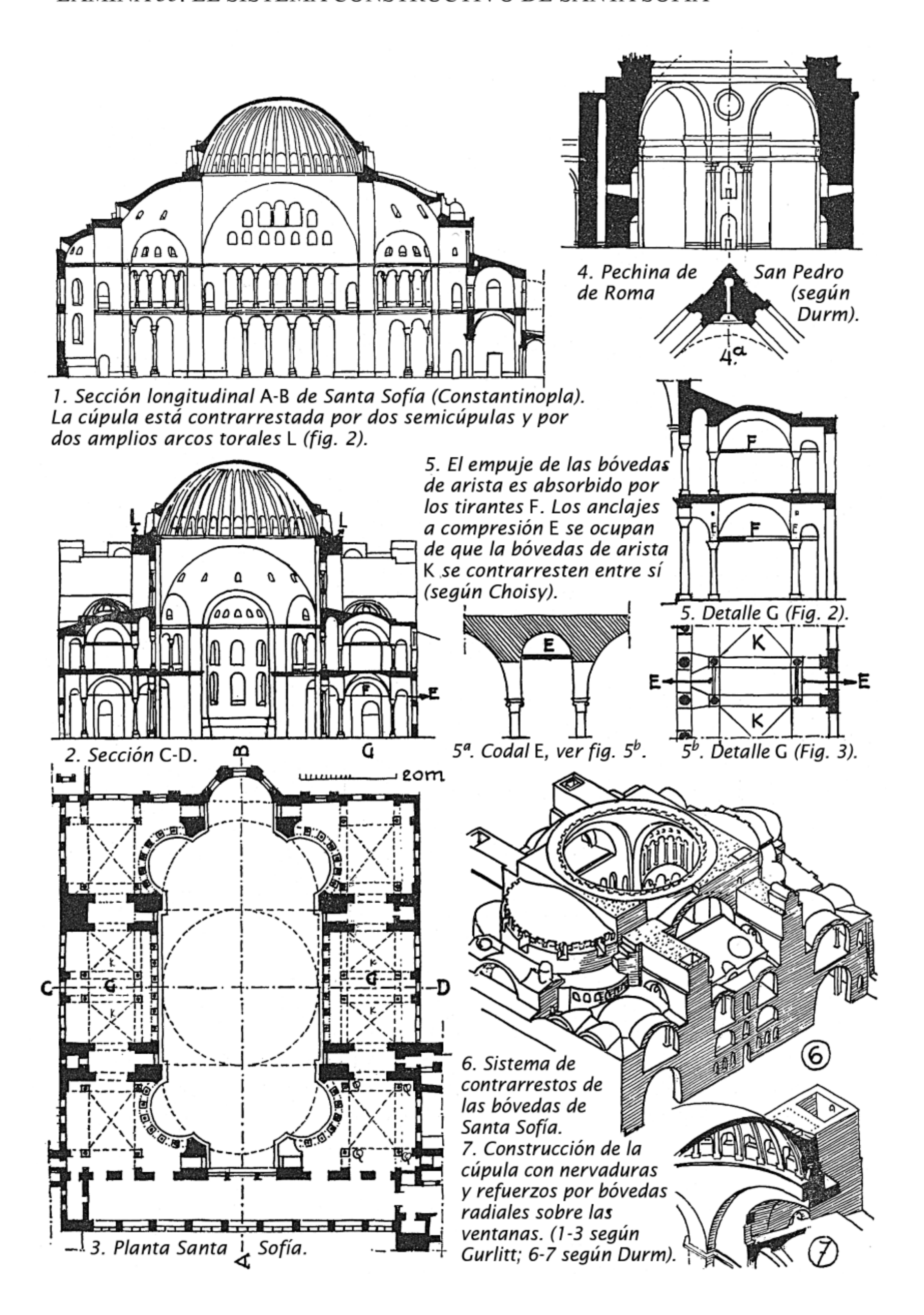
Santa Sofía de Constantinopla

El número de construcciones abovedadas bizantinas es extraordinariamente numeroso. En Constantinopla se encuentran bóvedas no solo en monumentos y en edificios utilitarios por encima del terreno, sino que incluso hay construidas grandes cisternas subterráneas cubiertas con bellas bóvedas.

Ninguna bóveda, sin embargo, supera en grandeza y en arrojo constructivo a la cúpula de Santa Sofía de Constantinopla, que ha quedado como testimonio permanente del genio de los maestros bizantinos (Lám. 35).

El emperador Justiniano mandó construir esta iglesia en el año 531; hizo traer materiales a Constantinopla desde todas las partes del imperio, encargando a dos expertos constructores, Antemio de Tralles e Isidoro de Mileto, la responsabilidad del trabajo. Desde el año 532 hasta 537 miles de obreros trabajaron a pleno rendimiento para hacer realidad esta grandiosa obra. El escritor de la antigüedad Procopio, testigo ocular de la construcción de esta enorme iglesia, recogió para la posteridad todo tipo de pormenores en una detallada crónica.

LÁMINA 35. EL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE SANTA SOFÍA



1. Sección longitudinal A-B *de Santa Sofía (Constantinopla). La cúpula está contrarrestada por dos semicúpulas y por dos amplios arcos torales* L *(fig. 2).*

2. Sección C-D.

3. Planta Santa Sofía.

4. Pechina de San Pedro de Roma (según Durm).

5. El empuje de las bóvedas de arista es absorbido por los tirantes F. *Los anclajes a compresión* E *se ocupan de que la bóvedas de arista* K *se contrarresten entre sí (según Choisy).*

5. Detalle G *(Fig. 2).*

5ª. Codal E, *ver fig. 5ᵇ.*

5ᵇ. Detalle G *(Fig. 3).*

6. Sistema de contrarrestos de las bóvedas de Santa Sofía.

7. Construcción de la cúpula con nervaduras y refuerzos por bóvedas radiales sobre las ventanas. (1-3 según Gurlitt; 6-7 según Durm).

La planta en su conjunto es un rectángulo cuyo centro está ocupado por un gran cuadrado al cual se conectan al este y al oeste dos grandes ábsides que, a su vez, están subdivididos por tres pequeños nichos (Lám. 35, fig. 3).

Sobre el cuadrado se erige sobre pechinas la cúpula de 32,5 m de diámetro; apoya sobre cuatro grandes pilares y está contrarrestada por los citados ábsides y, en el norte y en el sur, por grandes arcos torales. Bajo estos arcos hay un muro conteniendo arcos sobre columnas contra los que apoyan bóvedas de arista en la planta baja y en el primer piso (Lám. 35, figs. 1, 3, 5).

En una apreciación más cercana, resulta que los constructores unieron con un pequeño arco (Lám. 35, fig. 5) las columnas fuertemente cargadas con cúpulas, con las columnas sobre las que apoyaban las bóvedas de arista, mucho más ligeras, eliminando el peligro de asientos desiguales. A pesar de los cuidados adoptados aparecieron grietas durante la construcción. El arco en la parte oeste comenzó a agrietarse ya que la cimbra de apoyo no se mantuvo firme. El emperador dio la orden de trabajar todavía más deprisa y una vez que el arco se completó se cerraron las grietas.

Más grave era el estado de los arcos en los lados norte y sur: el asiento del arco toral estaba impedido por el muro perforado por arcadas construido debajo, con la consecuencia de que una gran parte del peso del arco era soportado por las columnas de granito de las series de arcos. Éstas no estaban calculadas para esto y se fracturaron. Entonces el emperador dio la orden de dejar suelta la junta bajo el arco de manera que el arco pudiera asentar.

El material se eligió cuidadosamente para las respectivas partes; los cuatro pilares y el comienzo de la corona de la cúpula se hicieron de piedra dura, pero el resto de la cúpula se hizo de ladrillos muy ligeros (36 × 36 × 5 cm) con grandes juntas de 2,5 a 5 cm, a cuyo mortero se había añadido polvo de ladrillo. Los arcos torales son de luces desiguales, 29,8 m y 22,6 m; en la coronación tenían cuatro ladrillos de espesor.

Apenas tenía la iglesia 22 años cuando tuvo lugar el hundimiento de la cúpula y del ábside oeste. La causa inmediata fue un terremoto, pero esta catástrofe se debió también a la rápida y poco competente retirada de las cimbras tras la ejecución, cayendo arrojadas al suelo sus pesadas vigas desde una considerable altura.

El sobrino de Isidoro fue encargado de la reconstrucción; subió el perfil de la cúpula aproximadamente 7,85 m, dejó las cimbras bajo los arcos tras la completa finalización durante una año y llenó la iglesia para el desmontaje con aproximadamente 3 m de agua sobre la que se dejaron caer las vigas. La cúpula del primer proyecto tenía un radio casi igual a la diagonal del gran cuadrado de manera que no había diferencia apreciable entre la pechinas y cúpula. Con la reconstrucción las pechinas se marcaron claramente, la cúpula perdió el carácter de bóveda vaída y fue dividida en arcos por veinte nervios que se ensancharon hacia abajo y se reforzaron en el arranque, y entre los cuales se trazaron pequeñas bóvedas con un ancho de 2 m en la parte inferior (Lám. 35, fig. 2).

En la coronación los nervios y las cúpulas se cerraron en una unión continua; formaron un anillo rígido de 11,8 m de diámetro con espesor de 62 cm, pero en la base se interrumpieron por aperturas para la luz. El espesor de la cúpula sobre las ventanas es de 75 cm.

Desde el punto de vista constructivo, con esta ingeniosa partición de la superficie de la cúpula en partes portantes y soportadas, se añadió un nuevo elemento a la construcción abovedada. Los romanos habían colocado nervios de ladrillo en sus construcciones de bóvedas, pero éstos eran apenas visibles y estaban fuertemente unidos con la masa del hormigón. Los maestros bizantinos hicieron aquí una cúpula nervada que satisface nuestras modernas teorías; se eliminan las peligrosas tensiones de tracción anulares y solo se admiten tensiones de compresión que pueden ser absorbidas con suficiente contrarresto en la base. Esto fue en parte conseguido mediante los refuerzos en el arranque pero en periodos más tardíos el contrarresto se mejoró con pesados contrafuertes.

En Santa Sofía hay también un sistema de atirantado muy bien meditado. Los arcos anchos de las bóvedas de arista en las naves norte y sur fueron unidos con tirantes. Los pequeños arquitos entre las columnas (en la mitad de la iglesia) reciben empuje lateral por dos lados; unos fuertes codales cuidan de que los arcos sean resistentes contra los empujes (Lám. 35, figs. 5, 5ª).

En el curso de los años muchas veces ha sido necesario, a pesar de todo, hacer reparaciones. Los terremotos han sido a menudo causa de asientos, por ejemplo en 787.

Para poder proporcionar más apoyo a los arcos y las cúpulas, hacia el año 1317 se levantaron por fuera unos sólidos estribos, las llamadas «pirámides» (Lám. 35, fig. 6).

Tenemos que agradecer a las restauraciones que se hicieron hacia 1847 por el arquitecto italiano Fossati el conocimiento de diferentes datos. Resultó necesario reparar todas sus partes; las galerías de arcos de los lados norte y sur estaban desplomadas por el fuerte empuje y tuvieron que aplomarse de nuevo; los arcos se descargaron eliminando cuatro pesados arcos de contrarresto en la cúpula que se sustituyeron por zunchos de hierro a su alrededor.

La cúpula resultó no tener una forma regular al haber padecido todo tipo de distorsiones y deformaciones.

Varios investigadores como Salzenberg, Lethaby, Swainson, Choisy y Gurlitt analizaron posteriormente en detalle la iglesia. Se mostraron llenos de admiración por el esmero puesto hasta en las partes más pequeñas. Así, por ejemplo, se colocó plomo en las uniones de las columnas en las partes donde el capitel descansa sobre el fuste y éste sobre la basa, y la estereotomía de los arcos y bóvedas sirvió de ejemplo a posteriores maestros constructores.

Influencias de la construcción abovedada bizantina

El arte del abovedado bizantino no quedó limitado al Imperio Romano de Oriente sino que dejó también huellas en Italia. Se encuentran construcciones bizantinas, entre otros sitios, en Venecia (San Marcos) y en Rávena (San Vital, Lám. 33, fig. 1). En el sur de Francia (Aquitania, Perigord) se desarrolló también en el siglo X una construcción de cúpulas sobre pechinas que no debe pensarse como una influencia directa de Bizancio. Aquí realmente actuaron tradiciones romanas, tal como las notables diferencias con las estructuras bizantinas parecen mostrar. Mientras en Bizancio la sección vertical de las cúpulas es la mayoría de las veces semicircular, en las cúpulas francesas la sección es peraltada. Las cúpulas están un poco retranqueadas respecto a los arcos torales, de manera que en la base surge un ancho borde continuo que puede utilizarse como galería (Lám. 33, fig. 4). La construcción de las pechinas es también diferente que en Bizancio, ya que aquí el material es piedra y en Bizancio casi siempre ladrillo. Finalmente puede señalarse que la sección de las pechinas francesas es ojival (Lám. 21, fig. 4; Lám. 33, fig. 4ª).

Sí se puede acreditar una influencia directa en la construcción de cúpulas y demás abovedados de la arquitectura turco-persa, rusa e islámica. Las construcciones con cúpula han tenido un gran desarrollo sobre todo en los países musulmanes; el cariño con el que especialmente fueron tratados los motivos de transición condujo a una característica y decorativa manera de construir.

También es patente la influencia de la construcción abovedada bizantina en la construcción de iglesias de nuestro país. Se puede apreciar quizá, en la bella cúpula de la sala del Emperador de S. Servaas en Maastricht, pero con seguridad en la construcción abovedada de fechas más recientes. Durante los últimos decenios los arquitectos J. Cuypers, Jan Stuyt y Jan van der Valk la tomaron como objeto de estudio para sus construcciones con cúpulas aportando valiosas contribuciones al desarrollo de la construcción abovedada. (Lám. 125–130).

4. 3 La construcción abovedada persa e islámica

En Persia la construcción abovedada se practicó sin cimbras de apoyo. Cuando se hacían arcos, los ladrillos se colocaban a menudo en paralelo a la directriz, lo que es diferente a lo usual entre nosotros, en donde los ladrillos se ponen perpendiculares a la directriz (Lám. 38, fig. 1). Estuvieron en uso diferentes formas de arcos; junto a dos formas propias, el arco apainelado apuntado (arco en quilla o arco persa), una suerte de arco tudor, y el arco oval peraltado, emplearon también el arco de medio punto y el apuntado (Láms. 36, 37).

Es interesante el artículo publicado por Van de Wijnpersse (1918) sobre el denominado «arco sasánida» de Ctesifonte (Lám. 36, fig. 4, 4ª). De su estudio resulta que en el aspecto estático los persas habían aplicado la catenaria de forma inmejorable. Puesto que la dirección del empuje de la bóveda sin sobrecargas sigue el perfil del arco, el espesor podría ser llevado al mínimo. Este arco no produce empujes excéntricos, al menos teóricamente. Sin embargo, los constructores dieron a este arco mayor espesor en el pie que en la coronación, muestra de un conocimiento constructivo excelente, ya que, por ejemplo, una distribución desigual de la carga sobre el terreno podría producir asientos diferenciales. También podrían darse fuerzas imprevistas sobre el arco, con

lo que la línea de empujes tendría un recorrido diferente (Lám. 36, figs. 4, 4ª). Este exceso de espesor proporciona mayor estabilidad a la bóveda. Las hojas de ladrillo discurren algo oblicuas hacia arriba debido a que la bóveda fue construida sin cimbra, de forma que las primeras hojas apoyan contra un sólido muro testero de fábrica (la inclinación de las hojas es de unos 80º con respecto a la horizontal).

En general, se evitaban las intersecciones de bóvedas de cañón; así, en un cruce se disponía una de las bóvedas más alta que la otra. Los constructores trataban siempre de contrarrestar las bóvedas mediante una sabia disposición del conjunto de las partes.

En la arquitectura islámica se ve un juego muy variado en la formación de arcos. Adoptaron la forma de herradura y la trilobulada que, según Choisy, deben su origen a consideraciones constructivas; los arranques se dejaron algo más salientes para el apoyo de las cimbras. Rellenando el ángulo entre los apoyos y el arco se obtuvieron las típicas formas islámicas (Lám. 39, figs. 2 y 3).

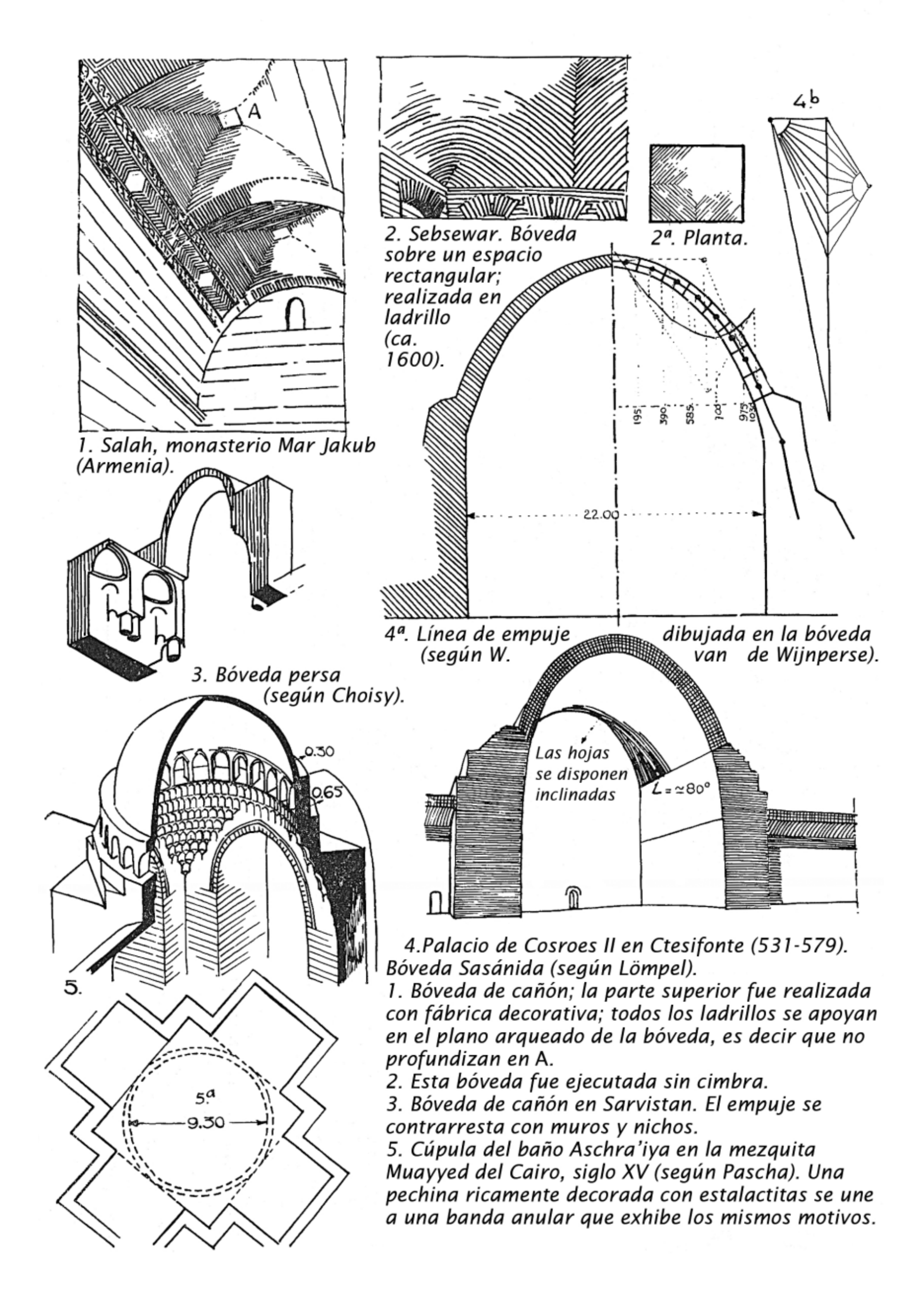
Con frecuencia los arcos se hicieron con ladrillos de distinto color y las juntas tomaron una forma complicada no justificada constructivamente, pero, en estos casos, los constructores tenían exclusivamente intenciones decorativas.

Cúpulas

Las cúpulas de los persas y de los musulmanes se asemejan en lo fundamental a las bizantinas (Láms. 36-39). La mayoría de las veces tienen forma peraltada, apuntada u oval, pero también pueden ser esféricas. Los ángulos del cuadrado sobre el que descansan se achaflanan con frecuencia por el exterior, buscando un efecto decorativo (Lám. 37, fig. 3, 4, 7, 8).

Los persas supieron manejar el ladrillo magistralmente y aplicarlo a la construcción de cúpulas. Vemos que los usan en todo tipo de trenzados, formando estrellas y otras figuras geométricas. El trasdós de las cúpulas se ejecutó con enorme cuidado, a veces con ladrillos vidriados o recubierto con tejas coloreadas, una forma de trabajo satisfactoria en un país de lluvias escasas. En la parte inferior, las cúpulas persas muestran frecuentemente una protuberancia mostrando un perfil bulboso. En las cúpulas hindúes o rusas esta protuberancia fue aún más acentuada (Lám. 37, fig. 5).

LÁMINA 36. SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN ORIENTALES



1. Salah, monasterio Mar Jakub (Armenia).

2. Sebsewar. Bóveda sobre un espacio rectangular; realizada en ladrillo (ca. 1600).

2ª. Planta.

3. Bóveda persa (según Choisy).

4ª. Línea de empuje dibujada en la bóveda (según W. van de Wijnperse).

4. Palacio de Cosroes II en Ctesifonte (531-579). Bóveda Sasánida (según Lömpel).

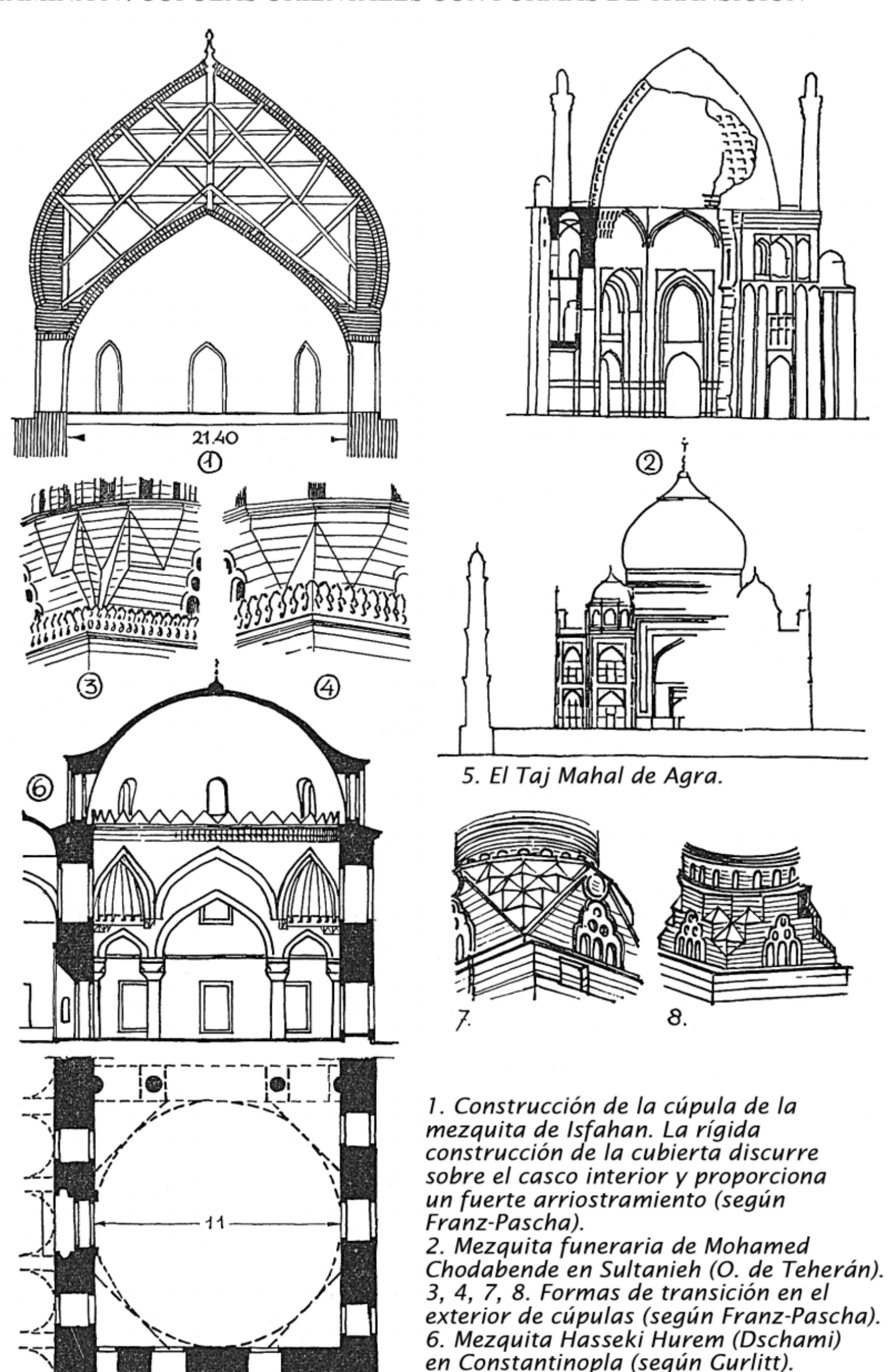
1. Bóveda de cañón; la parte superior fue realizada con fábrica decorativa; todos los ladrillos se apoyan en el plano arqueado de la bóveda, es decir que no profundizan en A.

2. Esta bóveda fue ejecutada sin cimbra.

3. Bóveda de cañón en Sarvistan. El empuje se contrarresta con muros y nichos.

5. Cúpula del baño Aschra'iya en la mezquita Muayyed del Cairo, siglo XV (según Pascha). Una pechina ricamente decorada con estalactitas se une a una banda anular que exhibe los mismos motivos.

LÁMINA 37. CÚPULAS ORIENTALES CON FORMAS DE TRANSICIÓN



5. El Taj Mahal de Agra.

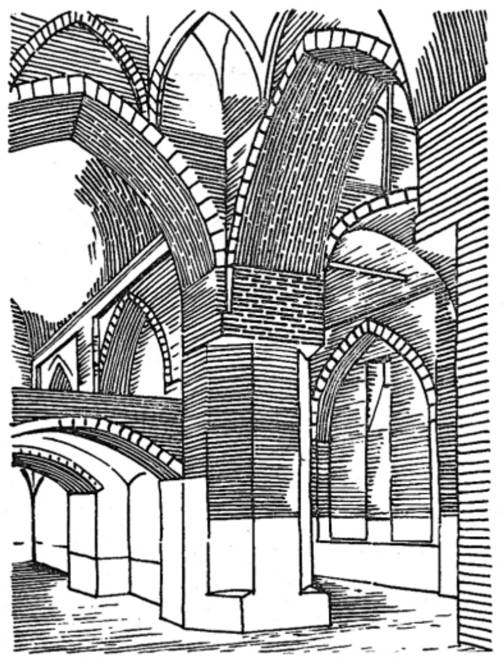
7.

8.

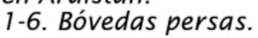
6ª. Planta

1. Construcción de la cúpula de la mezquita de Isfahan. La rígida construcción de la cubierta discurre sobre el casco interior y proporciona un fuerte arriostramiento (según Franz-Pascha).
2. Mezquita funeraria de Mohamed Chodabende en Sultanieh (O. de Teherán).
3, 4, 7, 8. Formas de transición en el exterior de cúpulas (según Franz-Pascha).
6. Mezquita Hasseki Hurem (Dschami) en Constantinopla (según Gurlitt).

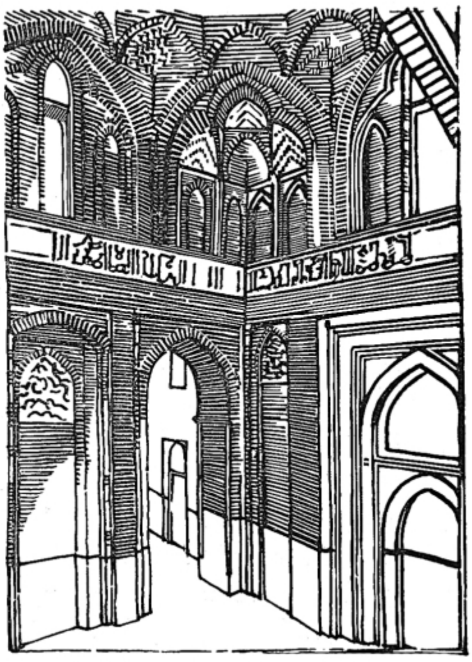
LÁMINA 38. BÓVEDAS DE LADRILLO PERSAS



1. La Mezquita denominada del Viernes en Ardistan.



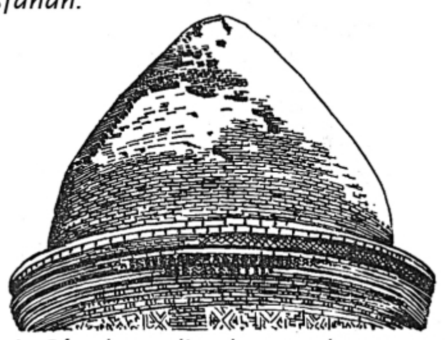
1-6. Bóvedas persas.



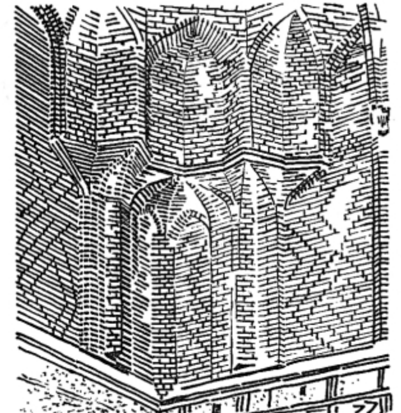
2. Solución de ángulo en fábrica de ladrillo en la mezquita del Viernes de Isfahan.



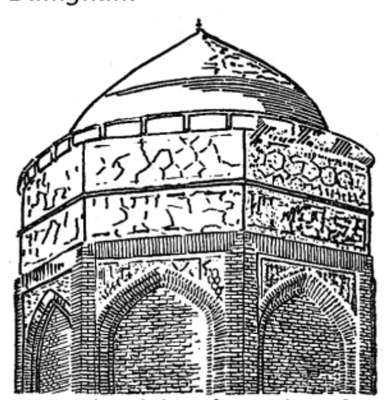
3. Cúpula de ladrillo con recubrimientos tabicados.



4. Cúpula realizada completamente en ladrillo. Torre de enterramiento en Damghan.



5. Solución de ángulo con pechinas de ladrillo.



6. Tumba del Imán Zade Jofar.

También se hicieron cúpulas de doble casco, uniendo las dos cáscaras mediante nervios o arcos de ladrillo. Con frecuencia, el espacio entre ambos cascos está ocupado por una estructura de madera que sirve entonces tanto para fortalecer la cúpula interior como para sostener la exterior (Lám. 37, fig. 1).

En el Renacimiento, este método, ya usado en la época románica, se aplicó otra vez en Italia en las grandes cúpulas de Florencia y Roma.

Entre las persas encontramos un bello ejemplo en la mezquita funeraria de Mohamed Chodabende en Sultanieh (al oeste de Teherán) (Lám. 37, fig. 2). La luz de esta cúpula alcanza los 22,5 m. Se eleva a partir de 30 m sobre los muros, completamente libre y sin rellenos, y asciende hasta una altura de más de 50 m. Las cúpulas interior y exterior tienen cada una un espesor de solamente 31 cm. Para absorber los empujes hay embebidas en el arranque tres anillos de sólidas vigas de roble rodeando su perímetro.

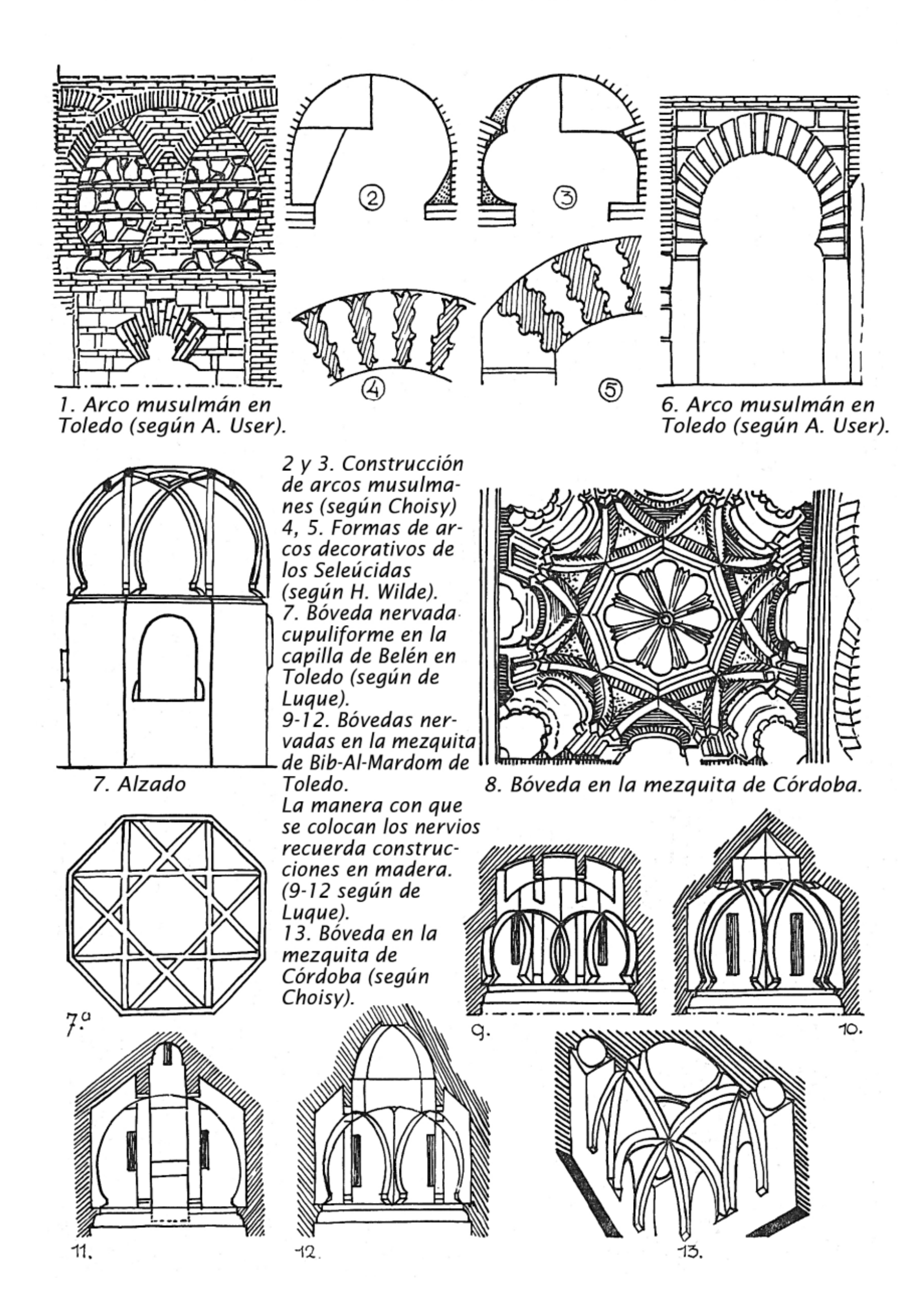
Bóvedas nervadas

Los musulmanes siguieron un método particular para hacer bóvedas nervadas. Tendían los nervios todos a la vez de igual manera que lo harían con costillas de madera. Pero mientras que con madera es fácil ensamblar unas con otras, los arcos de ladrillo se tienen que trabar muy bien entre sí para formar una construcción estable. Los ladrillos deben disponerse de forma muy precisa y la menor desviación, por ejemplo por asientos, puede tener inmediatamente consecuencias perjudiciales (Láms. 39, 41).

A veces los nervios discurren completamente exentos, de forma que como sistema de arcos de ladrillo tienen solamente un función decorativa. Normalmente estas bóvedas nervadas se aplicaron solamente en pequeñas luces. En los nártex y en pequeñas iglesias de la primera Edad Media en Siria y sobre todo en Armenia surgieron cubiertas formadas por un sistema de arcos como los descritos más arriba, dispuestos al mismo tiempo y con bóvedas trazadas entre ellos (Lám. 40).

En la construcción abovedada moderna este antiguo sistema de arcos cruzados discurriendo en paralelo fue usada por diversos maestros, entre otros por los arquitectos franceses Droz y Marrast en la construcción de la iglesia de St. Louis de Vincennes; por el benedictino Dom Bellot quien, en la abadía de St. Mary en Quarr (Inglaterra), hizo construir bóvedas de gran belleza, y por H. P. Berlage en

LÁMINA 39. CONSTRUCCIÓN DE ARCOS Y BÓVEDAS MUSULMANES



1. Arco musulmán en Toledo (según A. User).

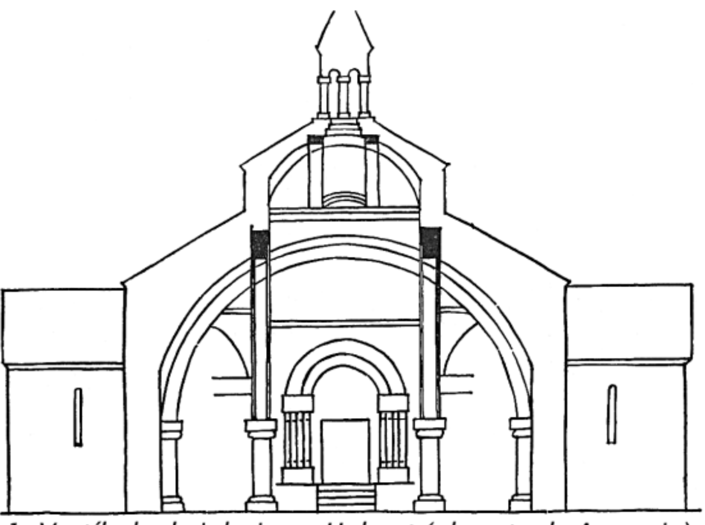
6. Arco musulmán en Toledo (según A. User).

2 y 3. Construcción de arcos musulmanes (según Choisy)
4, 5. Formas de arcos decorativos de los Seleúcidas (según H. Wilde).
7. Bóveda nervada cupuliforme en la capilla de Belén en Toledo (según de Luque).
9-12. Bóvedas nervadas en la mezquita de Bib-Al-Mardom de Toledo.
La manera con que se colocan los nervios recuerda construcciones en madera.
(9-12 según de Luque).
13. Bóveda en la mezquita de Córdoba (según Choisy).

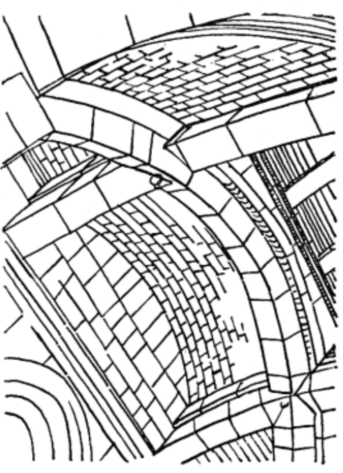
7. Alzado

8. Bóveda en la mezquita de Córdoba.

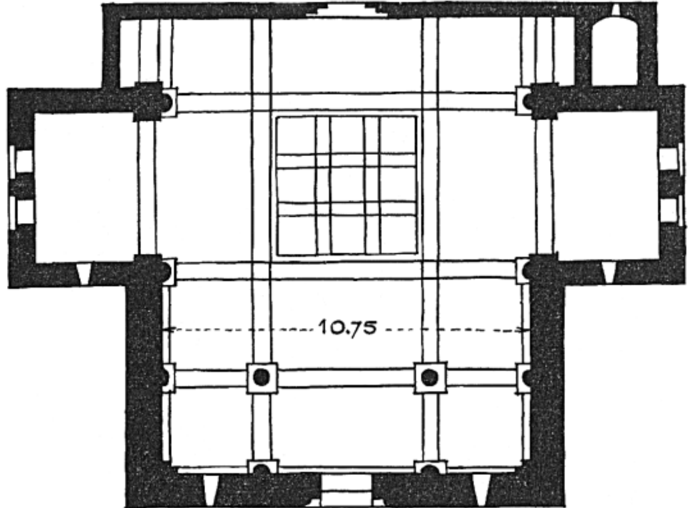
LÁMINA 40. BÓVEDAS ARMENIAS



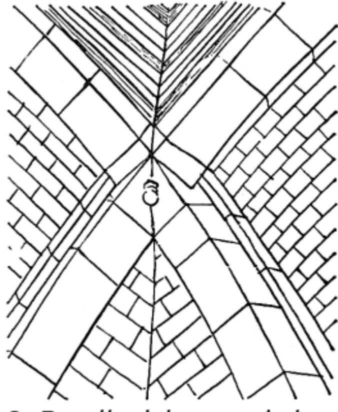
1. Vestíbulo de iglesia en Hahpat (al norte de Armenia).



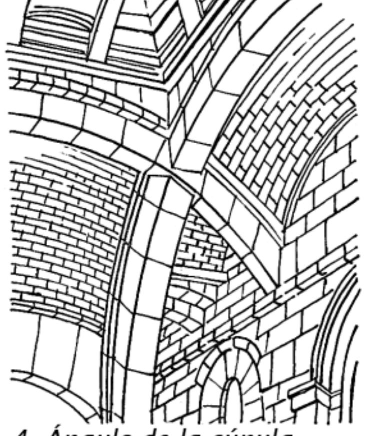
2. Enlace de la bóveda con muro trasero. Los arcos se cortan entre sí. En la posición del cruce se ha tallado un pequeño motivo decorativo.



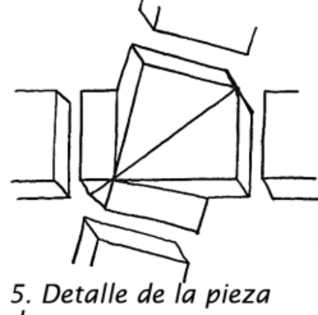
1ª. Planta (planta de la cúpula en el cuadrado central).



3. Detalle del cruce de los arcos.



4. Ángulo de la cúpula.

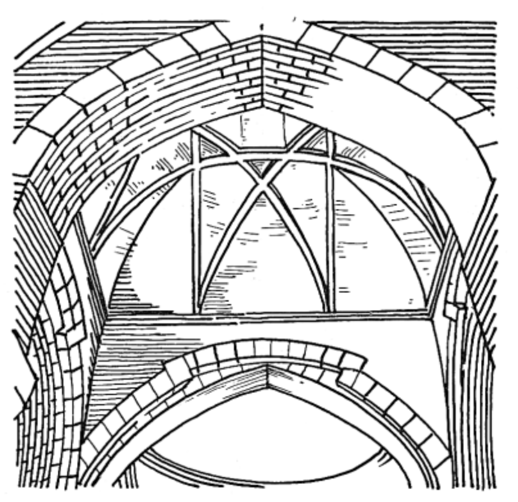


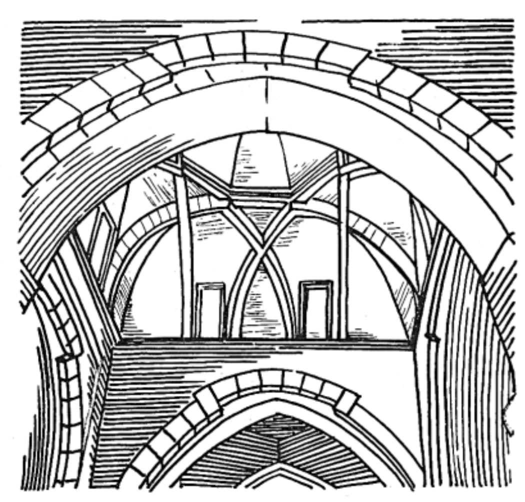
5. Detalle de la pieza de cruce.

(1, 1ª y 5 según mediciones de Jurgis Baltrusaitis).

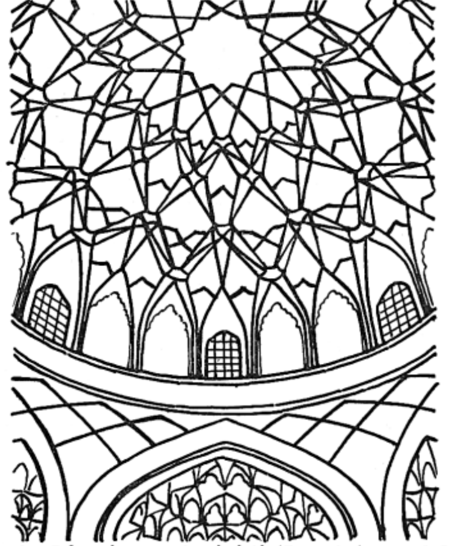
1-5: En Armenia la combinación de cuatro arcos cruzados con bóvedas entre ellos es muy frecuente. Se han conservado varios monumentos de los siglos X y XIII en los que se pueden ver antecedentes del Gótico. Esta bella bóveda está soportada por cuatro arcos de 75 cm de espesor; soporta a su vez una bóveda situada por encima.

LÁMINA 41. BÓVEDAS PERSAS E HINDÚES. COMPARACIÓN CON UNA BÓVEDA GÓTICA

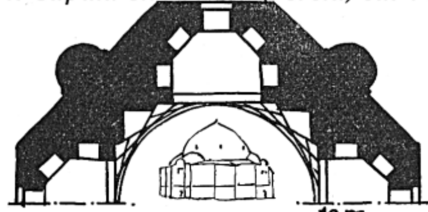




1-2. Bóvedas nervadas persas en la mezquita del Viernes de Isfahan. Hay un notable parecido entre estas bóvedas y las nervadas góticas (ver fig. 3). La disposición de los elementos es diferente de lo usual en el gótico occidental.

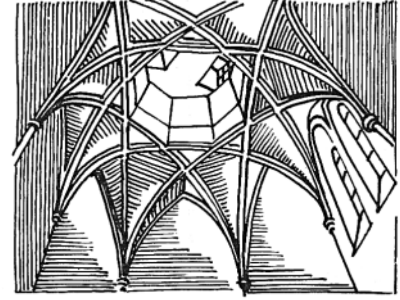


4. Cúpula en Ardebil (Persia) ca. 1600.



4ª. Planta.

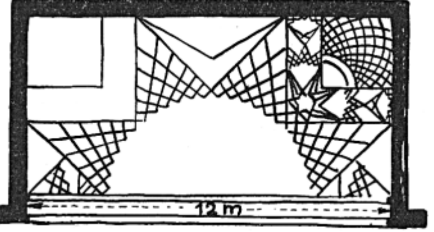
4. Esta cúpula con su complicado relleno decorativo entre los nervios muestra un carácter hindú típico.
(3. según F. Bond, 4. según F. Sarre)



3. Bóveda en la cocina del priorato de la catedral de Durham.



5. Nicho abovedado en Agra (1613).



5ª. Planta (según E. La Roche).

construcciones de pequeña dimensión y también en algunos grandes proyectos salidos de su mano (Lám. 123).

Formas de transición: El triángulo turco

En la arquitectura turca se desarrolló una forma típica de transición consistente en un plano triangular en voladizo. A veces se limitó la colocación de este plano a los cuatro ángulos de una cúpula sobre planta cuadrada, pero normalmente se dividió en pequeñas unidades y se combinó con un friso dividido también en triángulos. Este friso está también un poco inclinado, pero evidentemente el mayor vuelo está en los ángulos, que deben ser rellenados. Este relleno puede hacerse de dos maneras. La más sencilla, por un plano triangular con el vértice hacia abajo y situado en el ángulo, formando una transición lógica del cuadrado al octógono (Lám. 42, figs. 2, 5^{d}).

A veces es el lado de la base el dirigido hacia el ángulo, pero entonces se tiene que hacer una pequeña transición para dejar bien cerrado el triángulo (Lám. 42, figs. $5^{a, b, c}$), por ejemplo colocando algunos pequeños planos inclinados. Aumentando la división de triángulos se obtiene un ornamento compacto que hace pensar en los trabajos de marquetería (Lám. 42, fig. 6).

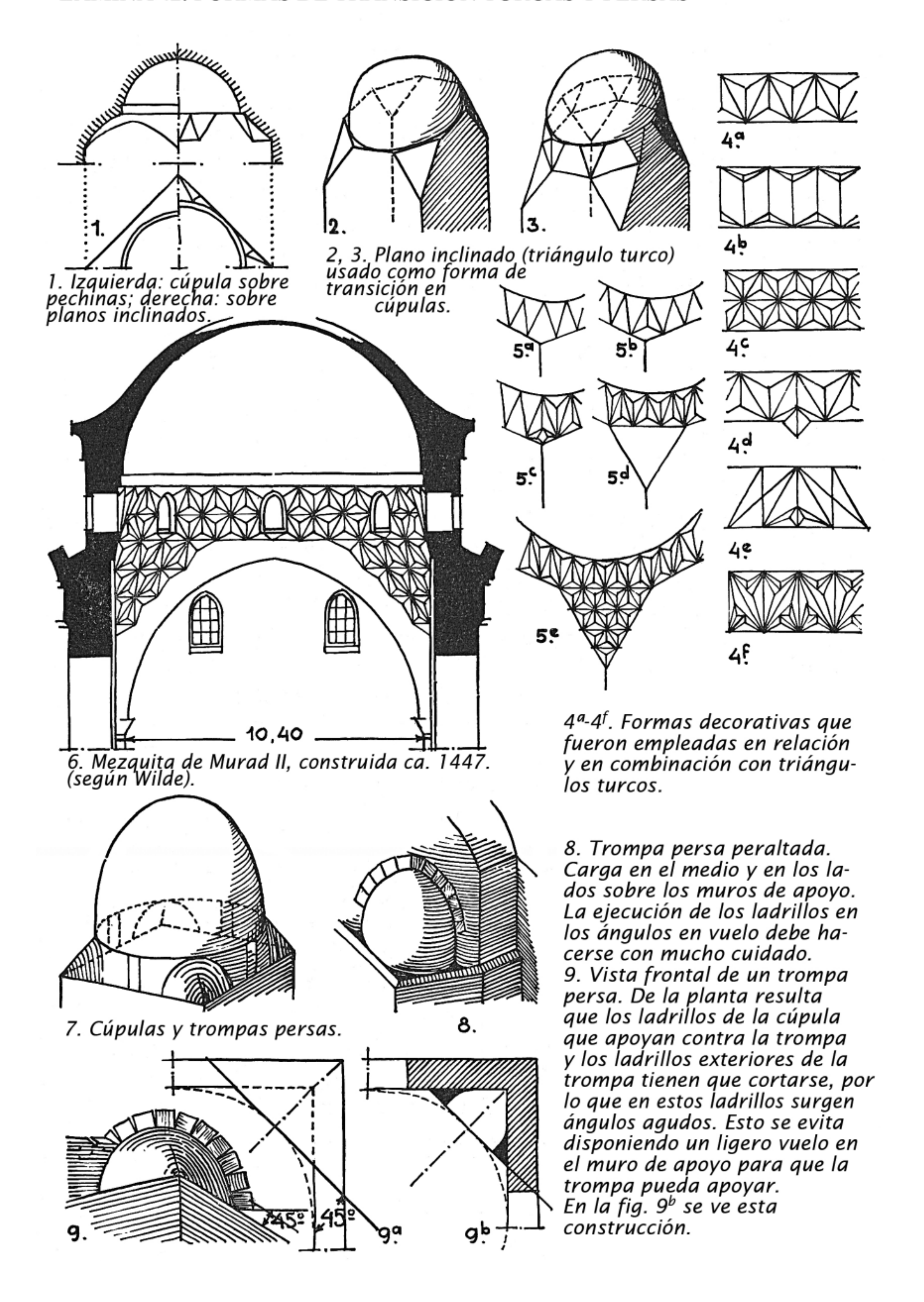
La ejecución de esta decoración era sencilla, pues se hacía la mayoría de las veces en yeso; además los planos se pintaban en vivos colores consiguiéndose un rico efecto decorativo. No es preciso indicar que desde el punto de vista constructivo esta forma de transición quedaría por detrás de la pechina.

Formas de transición: La trompa persa

Cuando los arquitectos persas tenían que hacer una cúpula sobre una planta cuadrada completaban los cuatro ángulos con motivos de transición formando un octógono regular; a continuación formaban el vuelo sobre los ocho ángulos con hiladas de ladrillo voladas en horizontal.

Con la realización de este motivo de transición siguieron su propio camino, eligiendo a menudo la bóveda semiesférica con las hiladas de ladrillo perpendiculares al eje. Además de esta trompa en forma de embudo, conocían también el nicho de planta semicircular cerrado por arriba con una semicúpula circular o apuntada (Lám. 42, fig. 8).

LÁMINA 42. FORMAS DE TRANSICIÓN TURCAS Y PERSAS



1. Izquierda: cúpula sobre pechinas; derecha: sobre planos inclinados.

2, 3. Plano inclinado (triángulo turco) usado como forma de transición en cúpulas.

6. Mezquita de Murad II, construida ca. 1447. (según Wilde).

4ª-4ᶠ. Formas decorativas que fueron empleadas en relación y en combinación con triángulos turcos.

7. Cúpulas y trompas persas.

8. Trompa persa peraltada. Carga en el medio y en los lados sobre los muros de apoyo. La ejecución de los ladrillos en los ángulos en vuelo debe hacerse con mucho cuidado.
9. Vista frontal de un trompa persa. De la planta resulta que los ladrillos de la cúpula que apoyan contra la trompa y los ladrillos exteriores de la trompa tienen que cortarse, por lo que en estos ladrillos surgen ángulos agudos. Esto se evita disponiendo un ligero vuelo en el muro de apoyo para que la trompa pueda apoyar.
En la fig. 9ᵇ se ve esta construcción.

También se encuentran nichos con una forma en planta rectangular o de arco apuntado y que además se cierran con una pequeña bóveda claustral circular o apuntada. Tales nichos asientan sólidamente sobre los muros de apoyo; fueron empleados por los persas con cierta preferencia.

Los primeras formas de nicho son bajas, con un arco apuntado rebajado; las últimas, esbeltas con un arco apuntado peraltado. Las formas de transición aquí indicadas tienen sin embargo un gran fallo; el inicio del último arco, es decir el arco frontal sobre los muros, tiene lugar bajo un ángulo de 45º, con lo que los ladrillos acometen de forma muy oblicua (Lám. 42, fig. 9).

El lado delantero del arco frontal formaría un plano alabeado si se construyera sin el arranque inclinado: en otras palabras, si el ángulo de 45º se llevara hasta un ángulo de 90º y la fábrica de la trompa y los muros se realizara en forma trabada.

Este defecto constructivo se evita deformando un poco la planta de la trompa de manera que la ángulo de cierre llegue a ser casi recto. Los lados de la trompa vienen entonces a sobresalir un poco sobre la base surgiendo pequeños volados, típicos de las bóvedas persas.

Sin embargo no quedaron satisfechos con el hallazgo de esta solución; a menudo se hacía primero un arco frontal volado contra el que se construía la trompa, siendo así la ejecución mucho más libre (Lám. 38, figs. 1, 2).

Formas de transición: Los mocárabes

DESCRIPCIÓN Y ORIGEN: En la arquitectura islámica se emplean también como motivos de transición en voladizo conjuntos de diversas celdas llamadas mocárabes que, de forma ornamental, decoran bóvedas y perfiles e incluso se emplean como animación de superficies. La mayoría de las veces están ejecutadas en yeso pero se las encuentra también de ladrillo, piedra y madera. Una bóveda decorada de esta manera recibe el nombre de bóveda de mocárabes. Otro nombre posible sería bóveda celular o en panal de abeja ya que el principio constructivo estaría bien representado por las celdas o nichos en hileras en voladizo. Pero la denominación de bóveda de mocárabes es la consolidada por el uso y por tanto es la que mantendremos.

Estos motivos en voladizo muestran gran parecido con las trompas persas en forma de nicho; sin embargo se necesita dibujar algunas hileras de pequeñas trompas unas al lado de las otras para tener la impresión de una bóveda de mocárabes. Según J. Rosintal muy probablemente se partió de la trompa y más adelante se usó esta forma como motivo ornamental.

Un grupo de tales celdas colocadas sobre una bóveda, con su fuerte cambio de luz y sombra, dan la sensación de racimos colgantes y tienen mucha semejanza con las peculiares formas de las piedras de las cuevas disueltas por goteo. (Por este motivo, a veces se les llama bóvedas de estalactitas.)

Los mocárabes se pueden colocar sobre trompas, pechinas y triángulos turcos y continuarse por toda la bóveda adyacente. Con el tiempo se desarrolló un método constructivo determinado, ligado a reglas más o menos fijas.

CONSTRUCCIÓN DE BÓVEDAS DE MOCÁRABES: Suponemos que todas las celdas son de igual altura, anchura y profundidad. Si esto no es así, o si resulta que el método matemático a seguir no se aplica en todas partes con igual rigor, se han de hacer algunos cambios (también el albañil se toma grandes libertades en la ejecución) cuyas modificaciones se plantearán con más detalle. Este conjunto de celdas parece al ojo enormemente complicado; en realidad es sin embargo bastante sencillo.

Como ejemplo de construcción tomamos una cúpula sobre planta octogonal, a la cual vamos a dotar de una bóveda de mocárabes (Lám. 43, fig. 1). Se traza en la planta un octógono regular y la circunferencia inscrita *A* se divide mediante radios en un número par (tomamos, por ejemplo, 48) de partes iguales. Se colocan las alturas *h* de los mocárabes, elegidas a sentimiento, en la sección vertical.

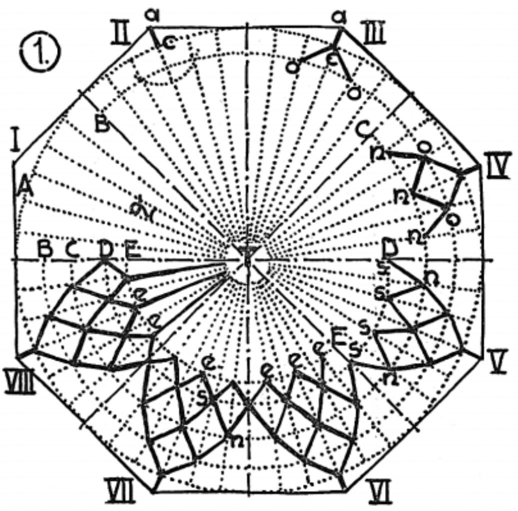
Las primeras ramas en las que descansan los mocárabes salen de los vértices del octógono; en planta estas ramas son los pequeños segmentos *ac,* y los puntos *c* son, por tanto, los puntos de corte de la circunferencia con los radios que salen de *a.* (Estas primeras ramas tienen un cierto espesor, es decir, son cuerpos con una sección rectangular o triangular.) Desde los puntos *c* se prosigue con la ramificación; en la elección de la longitud de las ramas se es bastante libre, pero una vez que se ha tomado, es la medida de las siguientes ramas.

Se trazan arcos de circunferencia con radio la longitud elegida y centro *c* que cortan en *o* a los radios contiguos a *Tc,* resultando $2 \times 8 = 16$ puntos de apoyo para las celdas de la hilera siguiente. Como los radios *Tc* son iguales entre sí y la longitud *co* se ha tomado igual en todas partes, siendo los centros de los ángulos *cTo* también iguales, los puntos *o* se sitúan sobre la circunferencia *B,* concéntrica a la *A*. Las circunferencias concéntricas *B, C* y *D* son, por tanto, los lugares geométricos de las series de puntos obtenidos por el trazado de arcos de circunferencia desde los puntos anteriores. (De la figura se deduce también que si elegimos la longitud *co* más pequeña que Tc tg $(\frac{360}{48})$, el número de radios se tiene que duplicar o multiplicar; para un determinado número de radios y un determinado diámetro de la circunferencia inscrita corresponde un límite mínimo de la longitud *co.*)

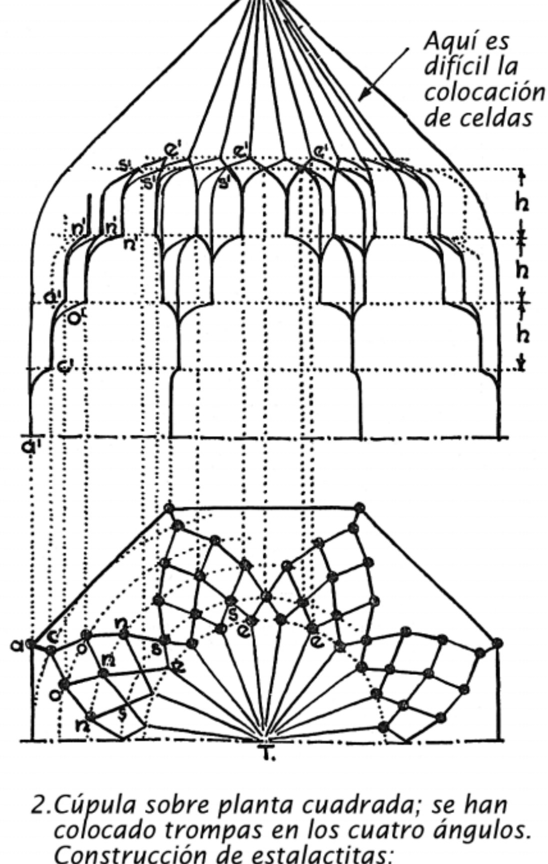
Desde los puntos *o* trazamos otra vez circunferencias con la longitud *co* y encontramos los puntos de corte *n* con los radios contiguos a *To.* Estos 24 puntos *n* están todos sobre la circunferencia *C.* Llevándolo a la proyección vertical de la cúpula vemos que ahora se forman sobre esta hilera 8 celdas *oco.* Los siguientes puntos *s* se obtienen también mediante arcos con radio de la misma longitud. Estos arcos dividen la circunferencia *D* en 24 partes iguales y aparecen 16 celdas sobre esta hilera. La hilera todavía no está cerrada en círculo ya que en los radios correspondientes a los ángulos 0º, 45º, 90º, etc. aún no hay celdas. Estas se colocan según el entendimiento del constructor, tal como con más detalle se indicará en el próximo ejemplo. La colocación de una hilera siguiente a más altura no es posible de forma sencilla; en relación con la altura disponible bajo la cúpula, las celdas volarían tanto hacia delante que serían inaceptables, tanto estética como constructivamente.

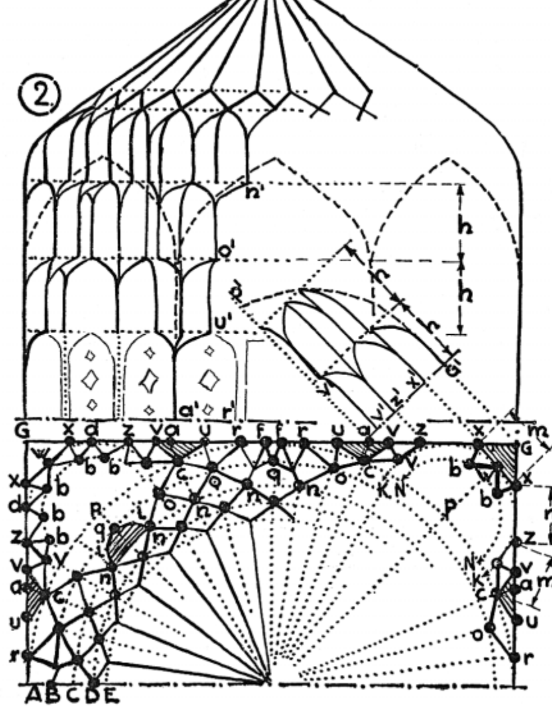
La cúpula se cierra por ello con una bóveda estrellada que se coloca en concordancia con las celdas obtenidas. En la planta esto se manifiesta en el alargamiento de las ramas *ns* hasta que se cortan de dos en dos en los puntos *e,* situados sobre la circunferencia *E.* Estos puntos se unen con *T,* cuyas líneas de unión son las proyecciones en planta de los nervios de de la bóveda de cierre.

CONSTRUCCIÓN DE UNA TROMPA DE MOCÁRABES: Supongamos que queremos dotar con mocárabes la trompa de uno de los ángulos de una cúpula con plan-



I. *trazar la circunferencia inscrita* A*; dividir por radios en partes iguales* ($\alpha = 360^\circ/n$)
II. *colocar la rama* ac, *trazar arco desde* c
III. *el corte con los radios da los puntos* o *todos sobre la circunferencia* B
IV. *desde* o *arco de circunferencia con* co; *puntos* n *sobre circunferencia* C
V. *desde* n *arcos con radio* co; *puntos sobre ciurcunferencia* D
VI. *prolongar ramas* ns *hasta que se corten de dos en dos*
VII. *los puntos de corte están sobre circunferencia* E
VIII. *unir los puntos* e *con* T.





2. *Cúpula sobre planta cuadrada; se han colocado trompas en los cuatro ángulos.*
Construcción de estalactitas:
La división de las celdas de la cúpula se determina como sigue.
La hilera más alta (3ª) no es cerrada para ello se colocan las celdas "nigin" (con forma algo diferente).
Abatida la sección vertical de la trompa, se coloca en ella la altura h.
Las celdas de la trompa en concordancia con las de la cúpula (misma altura pero menos fondo). Las celdas GxWx *son transición hacia el ángulo* G*; en* c *se añaden las celdas* cvzv *(*cz=zx=xx=xz=zc=m*). Fuera de la trompa están las celdas:* u'r'a' *(sobre las partes verticales del muro). La rama* ac *recibe entonces la sección triangular* ucv.
La cúpula está al igual que en 1, cerrada por una bóveda estrellada (según J. Rosintal).
Comparar esta fig. con fig. 3 siguiente lámina.
Comentario: los puntos en proyección horizontal (planta) se han indicado por una letra, los correspondientes en proyección vertical con la misma letra con un acento.

ta rectangular. Se sitúa primeramente una hilera de celdas sobre la cual vendrá a descansar una segunda; esta segunda hilera sobresale media celda porque los puntos más altos de la inferior coinciden con los laterales de las celdas situadas sobre ellas, cuya hilera termina con una media celda. Normalmente se deja a las celdas continuar sobre la parte plana del muro de conexión, con lo que no se aprecia el efecto desagradable a la vista de una media celda.

Puesto que existe el riesgo de que la forma de la trompa se pierda por el fuerte efecto plástico de las celdas, las que se colocan en una trompa se hacen con menos profundidad que las de la bóveda grande. La colocación de las celdas sobre la superficie curva de la trompa no proporciona especiales dificultadas, si se tiene cuidado de que los puntos más altos de la hilera inferior se curven un poco hacia delante, para que los lados de las hileras que se sitúan encima pueden descansar sobre ella.

Si hay una diferencia en el fondo de la hilera inferior y la situada encima, se necesita un pequeño motivo de transición; si éste se coloca, entonces las celdas forman otra vez un conjunto compacto. Cuando en una cúpula se quiere decorar una trompa con mocárabes, se ha de poner atención a lo siguiente:

– que las celdas a situar sobre las paredes planas vayan unidas ininterrumpidamente con las de la trompa;
– que los puntos superiores de las celdas se sitúen sobre la superficie de la cúpula, la trompa o el muro. Aquí se colocan pequeñas figuras de transición por ejemplo un plano triangular o un taquito o ramita gruesos y sobresalientes;
– que las celdas de la trompa se tienen que hacer de algo menos profundidad que las de la cúpula y que se unan a ellas por pequeños motivos de transición o por celdas de una forma algo diferente.

COMBINACIÓN DE UNA CÚPULA Y UNA TROMPA DECORADAS CON MOCÁRABES: Como segundo ejemplo tratamos una cúpula de mocárabes sobre planta cuadrada en cuyos ángulos se han colocado cuatro trompas las cuales solamente constan de mocárabes (Lám. 43, fig. 2).

De igual manera que en el caso anterior determinamos la división de celdas de la cúpula. También aquí, la hilera de celdas superior no está cerrada por lo que se coloca una celda extra con forma algo distinta. Esta es la celda *nigin,* con la línea quebrada *gin* como proyección del paramento lateral, de manera que se pueden unir otras ramas en el quiebro *i* de esta línea.

En la figura se ha abatido la sección vertical de la trompa alrededor de la línea *PG.* Se ha transportado también la altura *h* (igual a la de las celdas de la cúpula).

Las celdas *Gxwx* sirven como transición hacia los ángulos *G,* en *c* se unen las celdas *cvzv* (los puntos *z* y *x* se han elegido de forma que cz = zx = xx = m). Los puntos más altos y las ramas sobresalientes hacia el frente *v* y *w* se sitúan sobre la circunferencia *K,* con centro en *P.*

Fuera de la trompa se elevan, sobre las partes verticales del muro, las celdas *ura.* En lugar de la rama *ac* ha surgido ahora un cuerpo con sección horizontal triangular; este es también el caso con la celda en el ángulo *G.* Las proyecciones de los puntos superiores de las celdas situadas en una hilera más alta se sitúan sobre la circunferencia *N,* cuya altura coincide con la de la circunferencia *C* en la planta de la cúpula.

Aplicación del método anterior a un pórtico en nicho de un palacio: Las construcciones matemáticas descritas más arriba fueron desarrolladas por el ingeniero J. Rosintal y llevadas a la práctica para el dibujo de los mocárabes de un gran pórtico-nicho del ahora en estado ruinoso palacio Dervaze-Deri-Kuschk en Isfahan, siendo objeto el citado nicho de un preciso levantamiento por E. La Roche (Lám. 44, fig. 3). Ambos dibujos muestran gran acuerdo entre sí aunque no son completamente iguales. Esto se explica si se tiene en cuenta que los puntos de partida de Rosintal no fueron exactamente los mismos que los de los constructores, puesto que la rígida y puramente matemática división del círculo inscrito en partes pares no se siguió en la práctica, ni fueron mantenidas exactamente iguales las alturas y profundidades de los mocárabes. La planta de la pechina tampoco es circular sino rectangular con las esquinas redondeadas. Además, en el levantamiento se aprecian diferentes planos usados como motivos de transición, que resultan necesarios para la ejecución.

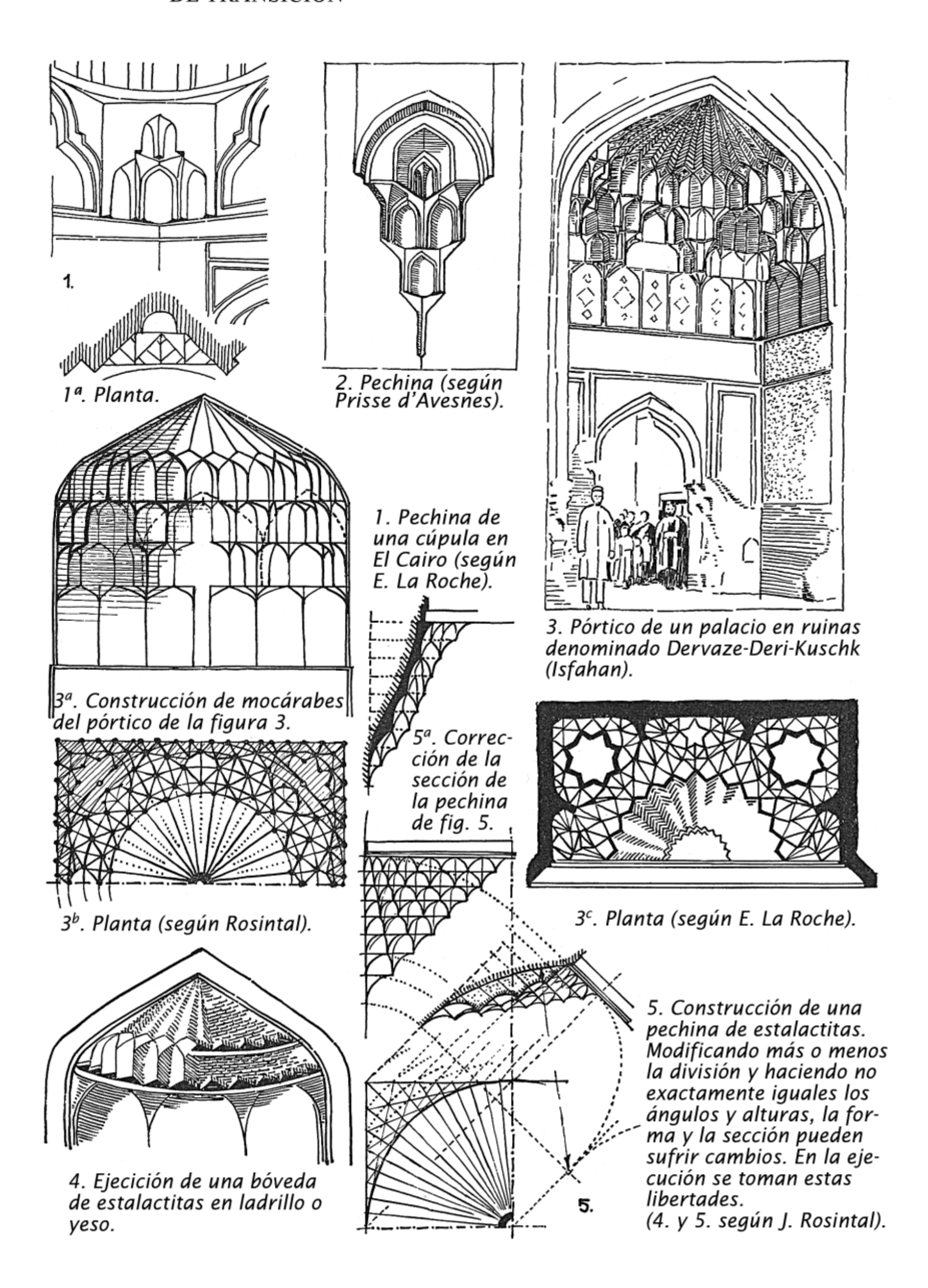
La pechina de mocárabes: Entre las construcciones citadas por Rosintal en su estudio hay también una indicación para el dibujo de una pechina con mocárabes (Lám. 44, fig. 5). La Roche plantea a esta construcción algunas objeciones. A su parecer Rosintal se equivoca aquí un tanto, ya que en la ejecución de la pechina por él dibujada las celdas deberían haber sido modeladas sobre una masa de pasta demasiado grande, dada la gran distancia entre el lado delantero de la celda y el muro de la pechina. Ambos sin embargo no percibieron que la sección vertical de la pechina no era circular sino ojival, ya que los Persas aplicaban casi siempre el arco ojival o el oval como sección de una cúpula (para la forma exacta de la sección de la pechina ver Lám. 44, fig. 50).

La mayoría de las veces la proyección de la pechina en planta tampoco es circular sino más débilmente curvada aproximándose a la elipse.

La ejecución de bóvedas de mocárabes: En la construcción de las citadas bóvedas de mocárabes no se está estrictamente obligado a seguir el dibujo realizado matemáticamente: sección y forma pueden sufrir cambios alterando más o menos la división o el tamaño de los ángulos, haciendo la altura de las celdas no exactamente igual en todas partes, y dando al albañil la libertad de solucionar las posibles dificultades que puedan surgir según su propio entendimiento. El maestro oriental buscó apoyo en la base matemática pero se sintió libre de ella si el replanteo a mano le llevaba más rápido a la solución deseada.

H. Saladin vio durante la ejecución de los edificios de la Exposición Mundial de París de 1878 trabajadores persas ocupados haciendo bóvedas de mocárabes. Dibujaban muy exactamente en el suelo la planta de los mocárabes; con ayuda de una plomada subían sucesivamente los puntos proyectados en el plano del suelo; continuaban esta misma manera de colocar puntos para los planos situados a diferentes alturas hasta llegar a lo más alto y la cerraban con una bóveda estrellada. La ejecución dependía enormemente de su habilidad (Lám. 44, fig. 4). Si las bóvedas se hacían en yeso, entonces la forma general se realizaba primero en ladrillo. Hacía falta algo más que simplemente pasos y medidas. Pero si la construcción se tenía que hacer en piedra era obligado estudiar con mucho cuidado el corte de la piedra y trabajar pieza a pieza la forma de éstas (Lám. 47).

LÁMINA 44. CONSTRUCCIÓN DE BÓVEDAS DE MOCÁRABES Y DE FORMAS DE TRANSICIÓN



1ª. Planta.

2. Pechina (según Prisse d'Avesnes).

3. Pórtico de un palacio en ruinas denominado Dervaze-Deri-Kuschk (Isfahan).

1. Pechina de una cúpula en El Cairo (según E. La Roche).

3ª. Construcción de mocárabes del pórtico de la figura 3.

5ª. Corrección de la sección de la pechina de fig. 5.

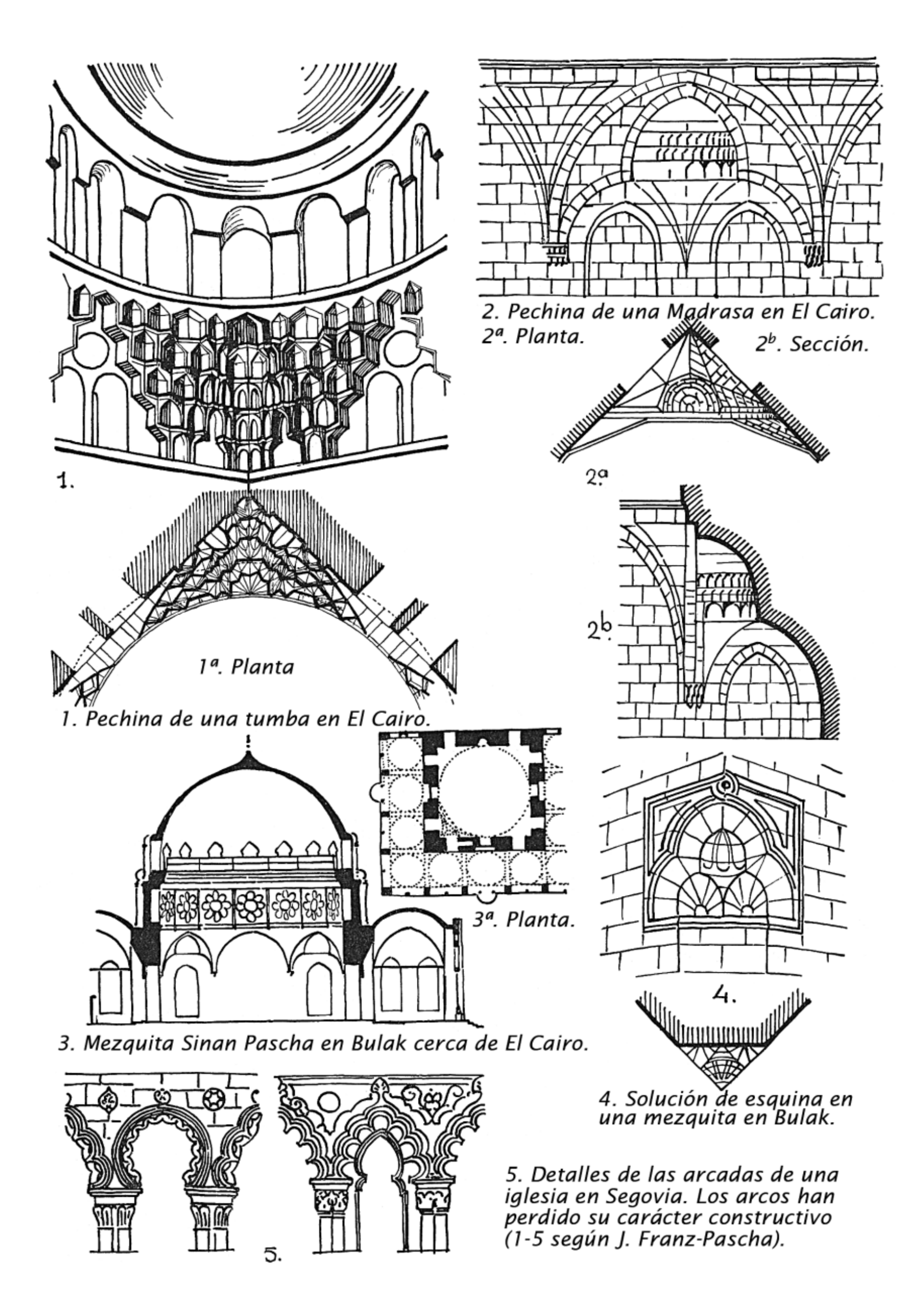
3b. Planta (según Rosintal).

3c. Planta (según E. La Roche).

5. Construcción de una pechina de estalactitas. Modificando más o menos la división y haciendo no exactamente iguales los ángulos y alturas, la forma y la sección pueden sufrir cambios. En la ejecución se toman estas libertades.
(4. y 5. según J. Rosintal).

4. Ejecición de una bóveda de estalactitas en ladrillo o yeso.

LÁMINA 45. FORMAS DE TRANSICION Y ARCOS MUSULMANES



2. Pechina de una Madrasa en El Cairo.
2ª. Planta.
2ᵇ. Sección.

1ª. Planta

1. Pechina de una tumba en El Cairo.

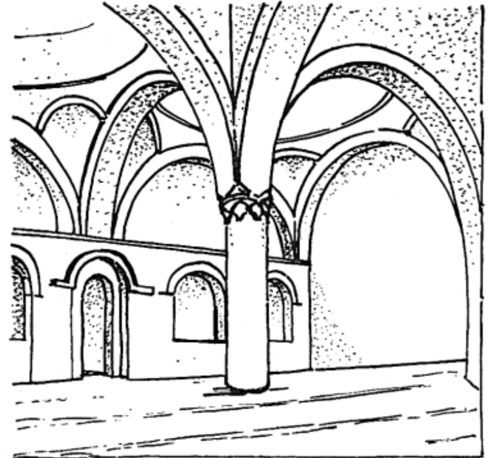
3ª. Planta.

3. Mezquita Sinan Pascha en Bulak cerca de El Cairo.

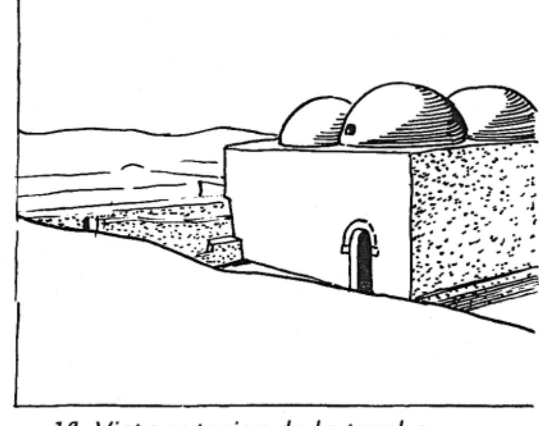
4. Solución de esquina en una mezquita en Bulak.

5. Detalles de las arcadas de una iglesia en Segovia. Los arcos han perdido su carácter constructivo (1-5 según J. Franz-Pascha).

LÁMINA 46. CONSTRUCCIONES CON CÚPULAS EN ORIENTE



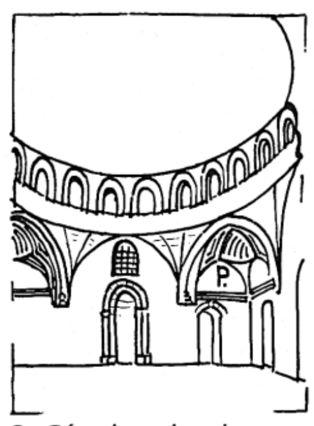
1. Tumba en Trípoli.



1ª. Vista exterior de la tumba.
El espacio está abovedado con cuatro cúpulas sobre pechinas. El empuje es recibido por gruesos muros.

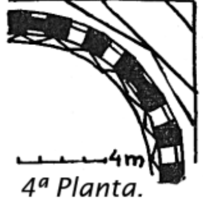
2. Tumba de Sâlih Nigmed-olîn en el Cairo (1249).
Una ancha banda decorada con mocárabes, discurre alrededor de la base de la cúpula, que se asienta sobre los los vuelos en las cuatro esquinas.

1^b. Planta.

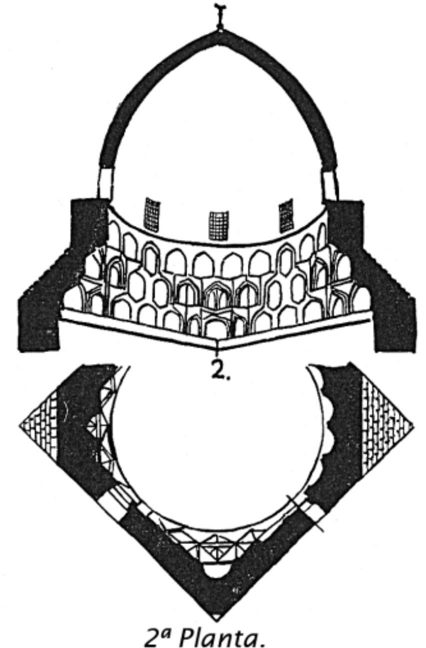


3. Cúpula sobre la tumba de Mahed-er-Rifa.
La luz alcanza 12,78 m.





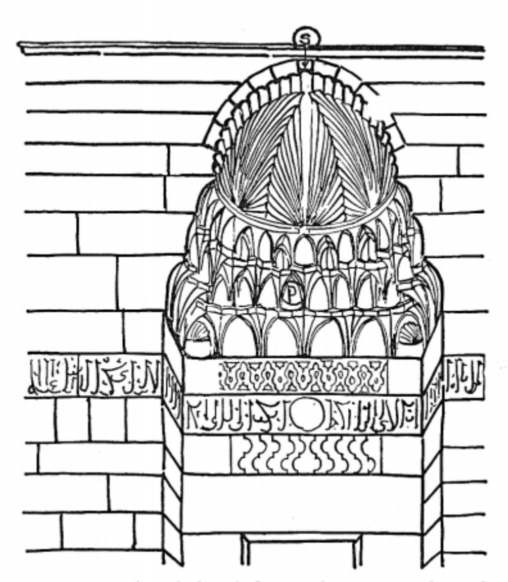
4ª Planta.

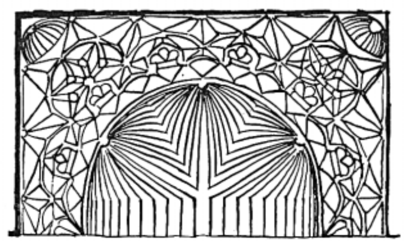


2ª Planta.

4^b. Detalle de pechina P (fig.3)
Esta cúpula se construyó en los siglos XV-XVI.
(2-4 según E. La Roche).

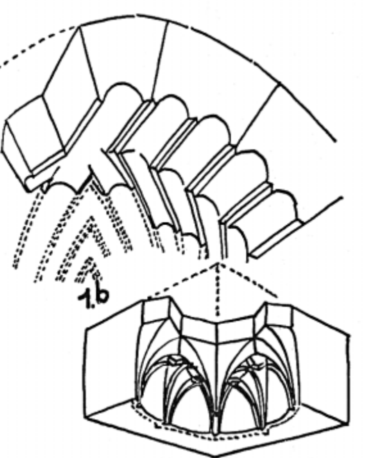
LÁMINA 47. BÓVEDAS EJECUTADAS EN PIEDRA EN JERUSALÉN



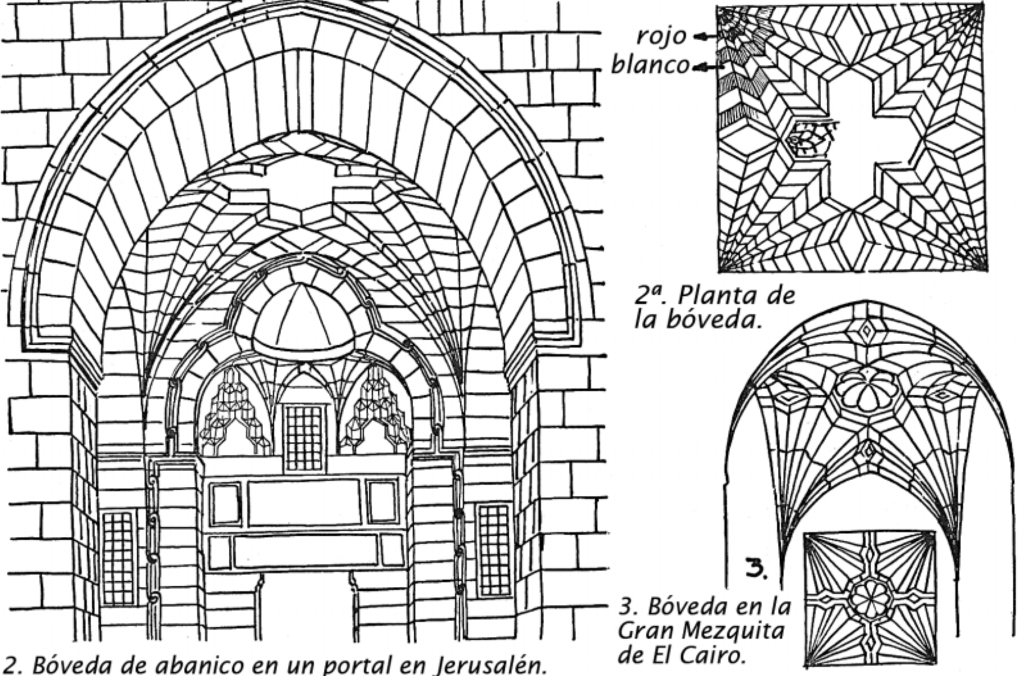


1ª. Planta (vista hacia arriba).

1. Entrada del edificio de juzgados de Jerusalén (1483). Esta bella composición fue proyectada sobre una base geométrica. Normalmente los orientales hacían las diferentes formas por separado, libremente a mano, si con ello alcanzaban su propósito más rápidamente.
1^{b}. Detalle de la clave S. 1^{c}. Detalle de una de las pechinas P de la segunda hilera.



1^{c}. Detalle de la pechina P.



2ª. Planta de la bóveda.

3. Bóveda en la Gran Mezquita de El Cairo.

2. Bóveda de abanico en un portal en Jerusalén.
En el siglo XV se desarrolló en Egipto y Palestina una construcción abovedada de gran notoriedad, destacada por sus bellas formas reconocibles mediante el uso de materiales de distintos colores (según W. Harvey).

No se podía volver hacia atrás; las demostraciones de la gran habilidad de los operarios orientales en la realización de sus decorativas bóvedas de mocárabes son numerosas.

4.4 La construcción abovedada hindú

La construcción abovedada de la India muestra su propio carácter y alcanzó altas cotas tras la conquista y dominación del país en el siglo XV por los musulmanes. Los operarios descollaron desde antiguo por su gran habilidad técnica. Los musulmanes les dejaron una gran libertad en la aplicación de técnicas y eligieron entre ellos a los maestros de más talento para la construcción de sus mezquitas, palacios y grandiosos edificios funerarios.

La arquitectura muestra algunas características típicas de la construcción en madera, aunque fueran construcciones de fábrica. Con frecuencia, se apilaban grandes bloques de piedra unos sobre otros, que, colocados volando un poco cada vez, formaban falsas bóvedas. También tenían buen conocimiento del ladrillo y el material cerámico se empleaba con frecuencia en combinación con la piedra.

Los maestros constructores hindúes poseían una notable capacidad para combinar métodos de construcción foráneos con los suyos propios. Las construcciones abovedadas persas y turcas, sus voladizos y pechinas, fueron también usadas por los maestros hindúes en la construcción de sus cúpulas y desarrolladas hacia nuevas aplicaciones.

Lo simbólico jugó también un gran papel. Diferentes formas se explican por el hecho de que los constructores les asignaban una intención simbólica. Así, el interior de las cúpulas llegó a ser a menudo elaborado como una gran flor de loto, el exterior decorado con una corona de hojas de loto, y el remate engalanado con un botón de loto.

Aunque en las construcciones de fábrica frecuentemente parecen imitaciones de enlaces de madera, su trabajo muestra un gran saber y conocimiento del material. Como la elaboración del hierro había alcanzado un gran nivel de perfección (hacia 400 d.C. ya se hacía hierro libre de óxidos de gran calidad), los hindúes dispusieron de los medios necesarios para unir adecuadamente los bloques de piedra en las bóvedas.

Famoso es el inmejorable mortero que consiguieron hacer y cuyo arte aún hoy en día practican de forma excelente. La fábrica de áridos fragmentados llegó a ser gracias a él una masa pétrea de gran dureza y el trabajo de enlucidos adquirió gran calidad.

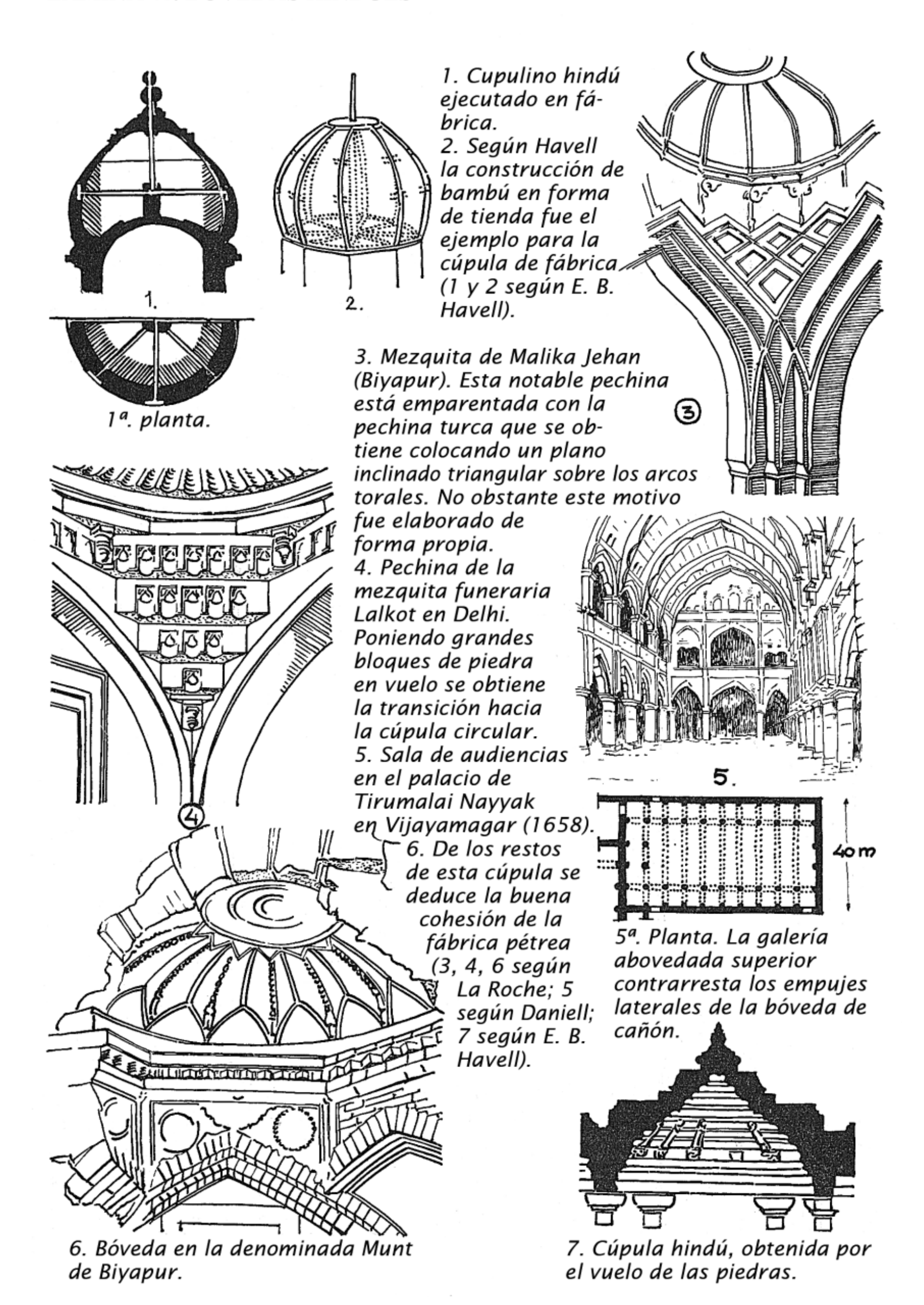
En la India, con un clima caluroso y rico en lluvias, es de la máxima importancia proteger el exterior de las construcciones de fábrica contra el fuerte azote de las aguas y también contra los rayos del sol. Por ello se recubrían las cúpulas con terracotas, vitrificadas o no, o con piedra; cuando no había fondos suficientes, se empleaban enlucidos. Estos revestimientos llegaron a ser de gran dureza y podían pulimentarse. Se mezclaban con fina arena blanca o con polvo de piedra caliza con lo que se podía obtener una superficie blanca que reflejaba los rayos del sol.

Las diferentes formas abovedadas que aparecen en la arquitectura islámica vuelven a encontrarse de nuevo en la India. Las principales son la cúpula, la semicúpula, la bóveda de cañón, la pechina y otras formas de transición.

Las cúpulas hindúes

Entre las construcciones abovedadas, las cúpulas ocupan un lugar preeminente. A menudo no esta claro si se puede hablar propiamente de bóvedas, como por ejemplo en los techos de piedra realizados mediante el vuelo sucesivo de grandes bloques de piedra, o en muchas estupas (monumentos religiosos) que en realidad eran casi sólidos macizos de piedra (Lám. 48, fig. 7). La forma más usual de hacer cúpulas fue la de colocar bloques de piedra en redondo unos encima de otros y en vuelo en hiladas consecutivas. Hasta aproximadamente la tercera parte de la altura se ejecutaba según un perfil circular pero desde allí hasta arriba según una forma cónica (Lám. 48, fig. 1). Cuando se quería que el perfil exterior de la cúpula fuera semicircular se hacía el espesor del casco en la parte superior más grueso que en la base; la sección de la cúpula adquiría así una forma que no es adecuada desde el punto de vista constructivo. En lo que al efecto decorativo se refiere estas obras son con frecuencia admirables ya que la sobreabundante ornamentación de molduras, con esculturas y abundantes motivos geométricos, se llevó a una armónica unidad.

LÁMINA 48. BÓVEDAS HINDÚES



1. Cupulino hindú ejecutado en fábrica.
2. Según Havell la construcción de bambú en forma de tienda fue el ejemplo para la cúpula de fábrica (1 y 2 según E. B. Havell).

1ª. planta.

3. Mezquita de Malika Jehan (Biyapur). Esta notable pechina está emparentada con la pechina turca que se obtiene colocando un plano inclinado triangular sobre los arcos torales. No obstante este motivo fue elaborado de forma propia.
4. Pechina de la mezquita funeraria Lalkot en Delhi. Poniendo grandes bloques de piedra en vuelo se obtiene la transición hacia la cúpula circular.
5. Sala de audiencias en el palacio de Tirumalai Nayyak en Vijayamagar (1658).
6. De los restos de esta cúpula se deduce la buena cohesión de la fábrica pétrea (3, 4, 6 según La Roche; 5 según Daniell; 7 según E. B. Havell).

5ª. Planta. La galería abovedada superior contrarresta los empujes laterales de la bóveda de cañón.

6. Bóveda en la denominada Munt de Biyapur.

7. Cúpula hindú, obtenida por el vuelo de las piedras.

Otro tipo de cúpula es la que se conforma con un sistema de nervios de piedra con un relleno de ladrillo. Havell opina que la forma de la mayoría de estas cúpulas se puede deducir de los usuales métodos hindúes de construcción con bambú. Es cierto que las formas tradicionales fueron realizadas con frecuencia con un material diferente que el de las construcciones originales, lo cual dice bastante a favor de su opinión, no obstante, existen también cúpulas realizadas completamente en ladrillo. A veces se hicieron cascos dobles para conseguir una mejor protección contra la lluvia y contra el calor del sol.

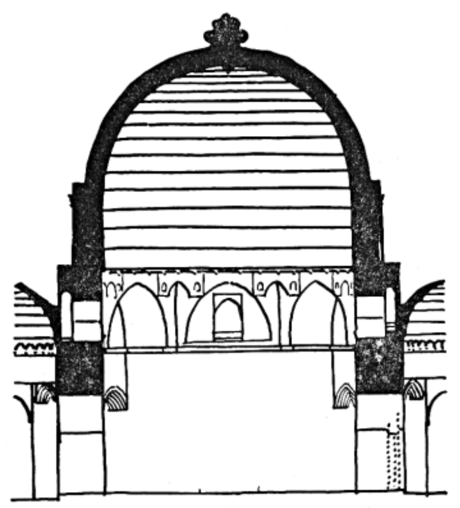
Un nuevo motivo de gran valor constructivo se añadió a las cúpulas mediante la aplicación, dentro de la cúpula, de un pesada masa de piedra en voladizo (realmente una serie de pechinas consecutivas) como apoyo de la base de la cúpula y que descansaba sobre un sistema de arcos entrecruzados. Las pechinas forman entonces un rígido anillo de piedra que proporciona un firme apoyo a la cúpula en la base. Este anillo era tan sólido que podía ofrecer resistencia a eventuales fuerzas radiales, pudiendo eliminar la influencia de las tensiones anulares (Lám. 49, fig. 2).

No hay datos suficientes como para poder determinar si los constructores hindúes consiguieron neutralizar esas peligrosas tensiones anulares de tracción mediante zunchos de hierro colocados en el espesor de la cúpula. Pero lo que sí podemos ver es que, como constructores prudentes, contaron con la posibilidad de que se dieran empujes laterales en la base y que contra ellos tomaron las necesarias precauciones, tal como ya se ha dicho, colocando masas de piedra en vuelo hacia el interior de la cúpula. Diferentes autores conceden gran valor a este hallazgo de los hindúes.

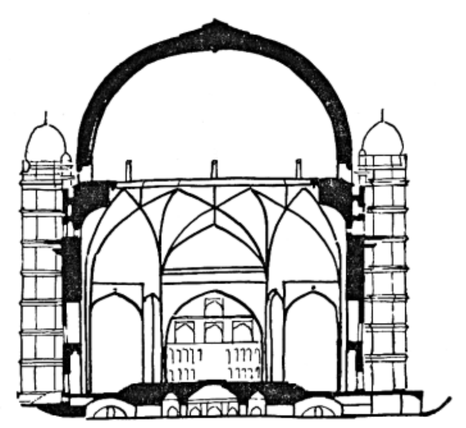
Según Fergusson, el constructor tiene una libertad casi ilimitada en la construcción de una cúpula con tal de que ésta se coloque sobre una base que sea sólida e inamovible; tendría que ser entonces muy incompetente si no pudiera dar a la cúpula suficiente estabilidad. Aunque no suscribimos esta opinión, como se verá al tratar los problemas de la estabilidad de las cúpulas, esta afirmación del eminente historiador, expresa la importancia que da a estas construcciones para él inquebrantables.

A veces se erigen sobre los ángulos del cuadrado sobre el que se erige la cúpula, altos minaretes que con su peso cargan los ángulos y ofrecen un contrarresto adicional a los empujes laterales.

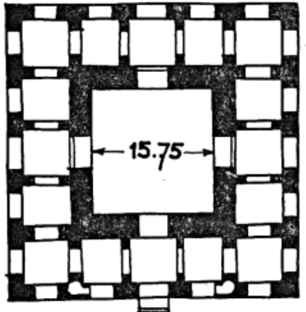
LÁMINA 49. CÚPULAS HINDÚES



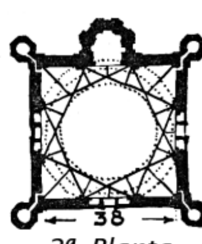
1. Cúpula sobre la tumba de Darya Khan en Delhi (archivo del servicio arqueológico). (ca.1453)



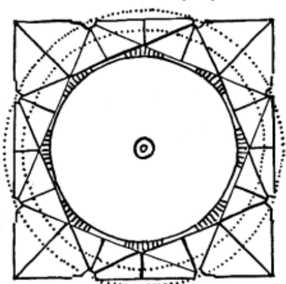
2. Cúpula sobre la tumba de Mohamed en Biyapur (1656).



1ª Planta.

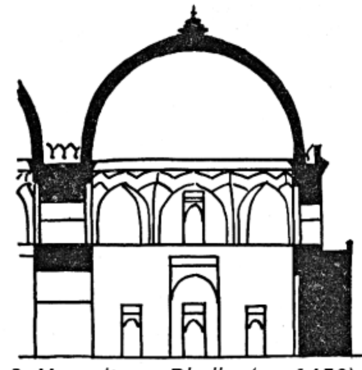


2ª. Planta.



2^b. Sistema de pechinas (2-2^b según Fergusson).

2. Las pechinas macizas en voladizo forman un anillo rígido en el pie de la cúpula que contrarresta los eventuales empujes laterales hacia el exterior.



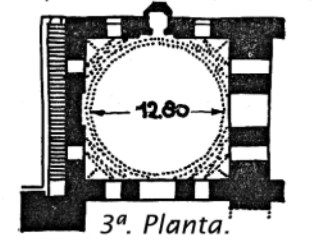
3. Mezquita en Dholka (ca. 1450).



3. El empuje de la cúpula se absorbe por pesados muros, horadados por arcos de tamaño relativamente pequeño (archivo del servicio arqueológico).



2^c. Sección perspectiva por la cúpula. La torres de esquina dan seguridad extra contra el empuje de la cúpula (según E. La Roche).



3ª. Planta.

El gran florecimiento de la construcción de cúpulas se dio en los siglos XVI y XVII, cuando, sobre todo en Biyapur, se elevaron ejemplos excepcionales. Este florecimiento fue parejo con un gran dominio técnico de las estructuras de ladrillo. La cúpula más grande es la del Gol Gumbaz (que quiere decir gran cúpula) terminada en 1656 sobre la tumba de Mohamed Adil Shah (Lám. 49, fig. 2).

Su luz alcanza los 38 m y la altura de la clave sobre el suelo es de 59 m. La planta cuadrada está abovedada parcialmente por una serie de arcos entrecruzados que forman un octógono de 31 m de diámetro. La cúpula apoya sobre este octógono, pero está retranqueada respecto a los muros, dejando una galería libre de 3,5 m de ancho. La pesada masa de ladrillo de la parte en voladizo tiene tendencia a caer hacia dentro y por tanto proporciona un empuje contrario al posible empuje ejercido por el peso de la cúpula. El espesor del casco de la cúpula alcanza los 3 m, que da una proporción, en relación con la luz, semejante a la de las cúpulas del Renacimiento. En conjunto, se trata de una sólida construcción que debe considerarse entre las más notables expresiones de la construcción abovedada.

Las semicúpulas

Las semicúpulas se sitúan sobre todo en las entradas de los edificios monumentales. Están decoradas frecuentemente con sobreabundancia. Sin embargo, también se pueden encontrar semicúpulas decorativas, normalmente de piedra, en vestíbulos más pequeños.

Las bóvedas de cañón

La bóveda de cañón más famosa es la que cubre la sala de audiencias del palacio de Tirumalai Nayyak (siglo XVII). De la forma de los grandes arcos festoneados se deduce claramente que la construcción en madera determinó su arquitectura. Estos arcos, en los que es bien aparente que están constituidos por tres partes hacen recordar escantillones de madera tales como los empleados por los árabes en sus ricamente decorados trabajos de yesería. Sobre los arcos se colocaron pesadas losas de piedra.

Las formas de transición

Las formas de transición de la construcción abovedada persa y turca tuvieron también aplicación en la construcción abovedada hindú. En ésta se desarrollaron incluso con un atavío decorativo más enriquecido. Además de ellos, se aprecian también otros motivos en vuelo que sin embargo no ofrecen apenas interés desde el punto de vista constructivo.

4.5 La construcción abovedada en la Edad Media

En la Edad Media los métodos de abovedado alcanzaron una gran perfección; en muchos aspectos se llegó a lo máximo posible, humanamente hablando. Como en nuestra época se construyen con frecuencia bóvedas de arista y de crucería, puede ser de gran ayuda estudiar cómo los maestros medievales solventaron las dificultades en la construcción de sus bóvedas.

Por ello profundizaremos también en los muchos detalles que nuestros predecesores proyectaron con tanto talento. Además, los arquitectos modernos pueden implicarse en la restauración de monumentos medievales, para lo cual es necesaria la comprensión de sus métodos constructivos. Finalmente, no es posible un buen entendimiento de la arquitectura medieval y de las numerosas opiniones y controversias existentes en torno a ella, si no se analiza al detalle la construcción abovedada.

La construcción abovedada románica

En la Edad Media temprana se asumió el legado de los romanos, cuyos métodos habían sido introducidos en toda la Europa Occidental. En la construcción de las primeras iglesias se emplearon tanto bóvedas de arista, como de cañón o cúpulas. Las cúpulas alcanzaron, sobre todo en Italia, un alto grado de perfección técnica. Puesto que estas cúpulas han tenido una influencia decisiva en el desarrollo de la construcción de las del Renacimiento, al tratar este periodo se profundizará con más detalle sobre estas obras (Lám. 99). En la construcción de las iglesias más antiguas se ve claramente la aspiración de conseguir una cubierta de fábrica, resistente al fuego, y de lograr una iluminación directa y lo mejor posible de la nave principal.

Al principio, el crucero se erigió más alto y cubierto con cúpulas, buscándose a menudo la posibilidad de colocar ventanales de iluminación bajo ellas (Lám. 50, fig. 3).

Mientras se construyeron bóvedas de cañón, que repartían el peso a todo lo largo de los muros de soporte, se vaciló en perforar los muros con grandes ventanas. Cuando se supo concentrar el empuje de las bóvedas sobre puntos determinados empleando bóvedas de arista, fue cuando por primera vez se intentó abrir huecos de iluminación de mayor tamaño (Lám. 50, figs. 1, 2).

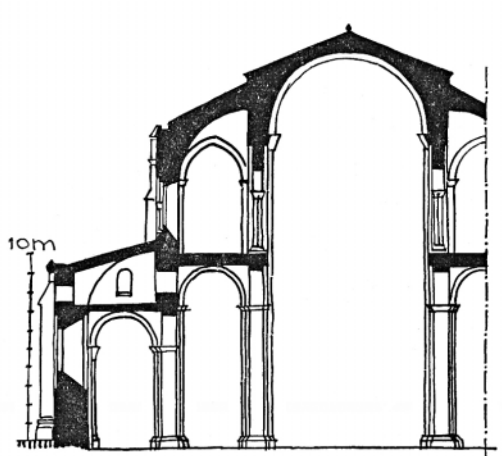
La bóveda de arista se prestaba a ello especialmente bien. No obstante, existía todavía el problema de cómo podían hacerse suficientemente resistentes los muros de la nave central que sobresalían por encima de las naves laterales. Sobre todo en las iglesias altas, los muros exentos representaban un peligro para la solidez. Por consiguiente en su mayoría las naves laterales se dotaron de un segundo piso, de una galería que hacía más rígido y fuerte el cuerpo de la iglesia. El uso de la galería se prosiguió en el primer gótico hasta que se supo proporcionar a la iglesia la rigidez necesaria exclusivamente con la colocación de arbotantes y estribos.

El empleo de la bóveda de arista románica llevó a dividir la planta de la iglesia en tramos cuadrados. La nave central se hizo el doble de ancha que las laterales y las bóvedas se tendieron sobre estos cuadrados de forma que un vano de la nave principal coincidía con dos vanos de las laterales (Lám. 54, fig. 1).

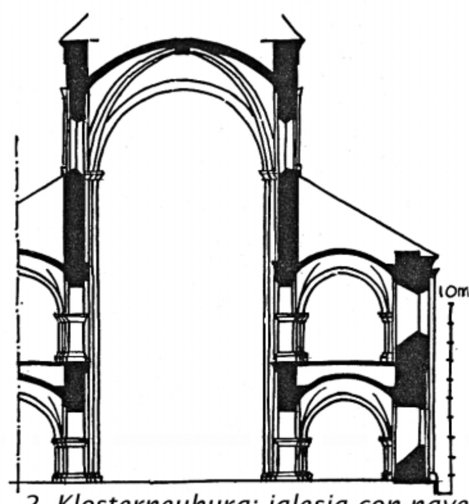
Los pilares que recibían los arcos diagonales y que, por tanto, soportaban más carga que los intermedios, tenían una sección mayor. Este sistema alternado siguió en uso en el gótico temprano, en especial en las iglesias cubiertas con bóvedas sexpartitas.

La bóveda de arista románica típica tiene planta cuadrada, los paños de la bóveda se cortan entre sí según líneas que resultan rectas en proyección y que coinciden con las diagonales del cuadrado (Lám. 52). Estas diagonales muestran a menudo, vistas desde abajo, bordes afilados, o sea aristas; en época posterior se colocaron nervios bajo ellas dando lugar a las bóvedas de crucería, que marcaron el estilo del gótico.

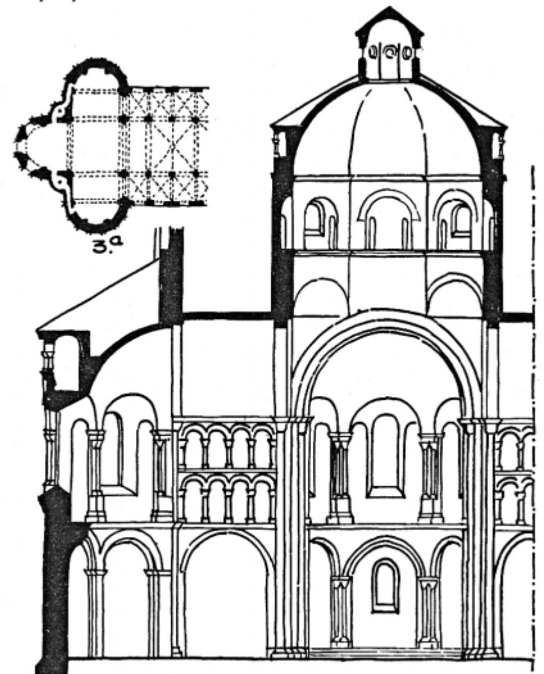
LÁMINA 50. BÓVEDAS ROMÁNICAS



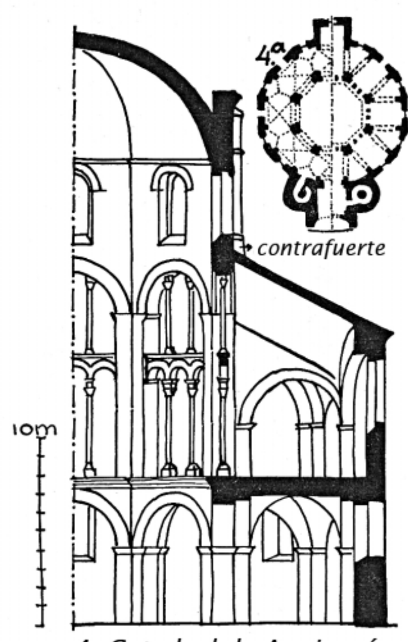
1. St Sernin de Toulouse; la cubierta apoya sobre el relleno de las bóvedas.



2. Klosterneuburg; iglesia con nave cubierta por bóvedas de crucería.



3. Iglesia de los Apóstoles, Colonia, con huecos de iluminación en la cúpula central.



4. Catedral de Aquisgrán, capilla Palatina.

1-4: Sistemas de abovedado románico.

1. La bóveda de cañón sobre la nave de la iglesia está contrarrestada por una semibóveda de cañón situada sobre la galería encima de la nave lateral. Esta galería proporciona un considerable refuerzo a la nave de central.
2. El empuje de la bóveda de crucería está neutralizado por los pesados muros de la iglesia, que además están cargados por un relleno sobre el que descansa la cubierta.
3. Las bóvedas de cañón discurren contra la cúpula. Semicúpulas en los ábsides
4. En la Edad Media también se empleó la planta central. Las bóvedas de cañón situadas alrededor contrarrestan la cúpula; por encima de ellas se han colocado contrafuertes. (1-4 según Dehio y v. Bezold)

Cuando las luces de los cañones de la bóveda son de distinta luz, las proyecciones de los nervios pueden ser líneas curvas. En la medida de lo posible se evitó la ejecución de este tipo de nervios, que no podían apoyarse sobre un plano y, por tanto, daban lugar a muchas complicaciones, sobre todo en el izado y colocación de la cimbra. Tampoco era precisamente fácil su replanteo (Lám. 5, fig. 1–4).

Por este motivo, se buscaba que sus proyecciones fueran líneas rectas; se partía de la intersección, adoptando para ella una curva cuya proyección fuera una recta. Así, la curva ya no estaba determinada por la intersección de dos superficies curvadas, sino que era la forma de los paños de bóveda la determinada por la curva de intersección adoptada (Lám. 6–8).

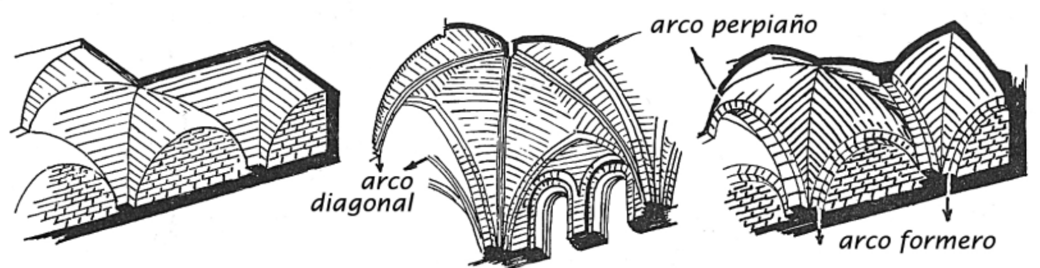
La intersección de dos cañones semicirculares que dio origen a la bóveda de arista, cedió su puesto a una forma más libre, en la que la forma de los cañones se adaptó a la curva elegida. En el hacer constructivo de las bóvedas de arista se trabajó, por tanto, de forma distinta a los romanos, que ejecutaban su fábrica sobre una cimbra corrida, que permite definir con facilidad la intersección.

Los constructores medievales concedieron una gran importancia a los nervios. En la intersección de dos cañones semicilíndricos las diagonales son elipses; pero muy pronto se hicieron dichas intersecciones semicirculares o de forma apuntada. Haciéndolo así se obtenían diferentes ventajas. Una elipse es un arco difícil de trazar ya que tiene dos focos desde los cuales puede construirse y las juntas no se pueden dirigir hacia un único punto. Además es un arco, desde el punto de vista estático, bastante desfavorable, puesto que la línea de empujes es difícil de mantener dentro de la rosca del arco.

Por ello se llegó a adoptar una semicircunferencia para los arcos diagonales o, al menos, un arco escarzano. Pero también con frecuencia se empleó, más de lo que generalmente se supone, un arco apuntado, ofreciendo este último la mayoría de las ventajas (Lám. 51, figs. 2, 3; Lám. 55, fig. 4).

Desde el punto de vista estático el arco apuntado es más ventajoso que el de medio punto, pues su empuje lateral es considerablemente menor. Además, los nervios de la bóveda se deben cortar en la clave y esta altura se puede obtener con facilidad dando mayor o menor peralte a los arcos apuntados.

LÁMINA 51. BÓVEDAS DE ARISTA ROMÁNICAS Y FORMAS DE TRANSICIÓN

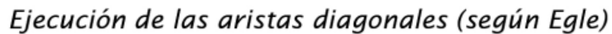


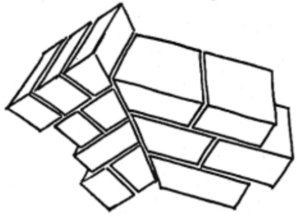
1. Bóveda de arista con líneas de clave rectas.

2. bóveda de arista con nervaduras.

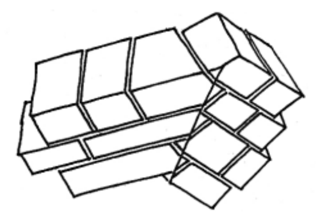
3. Bóveda de arista abombada.

1-3 Bóvedas románicas.
(según Dehio y v. Bezold)

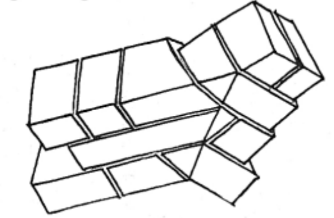

Ejecución de las aristas diagonales (según Egle)



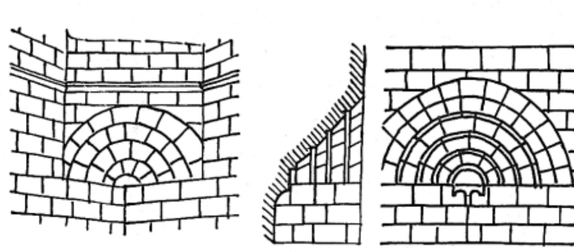
4. Encuentro de paños de bóveda con junta sobre la diagonal.



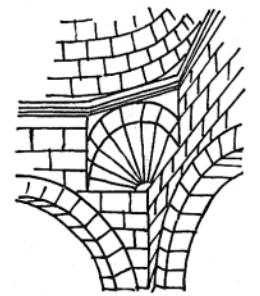
5. Las piezas están ligeramente trabadas.



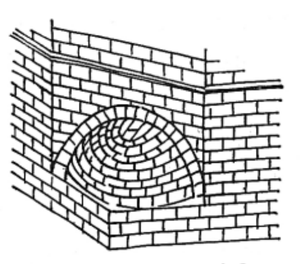
6. Las piezas están trabadas alternadamente.



7. Trompas románicas formadas por arcos concéntricos independientes.

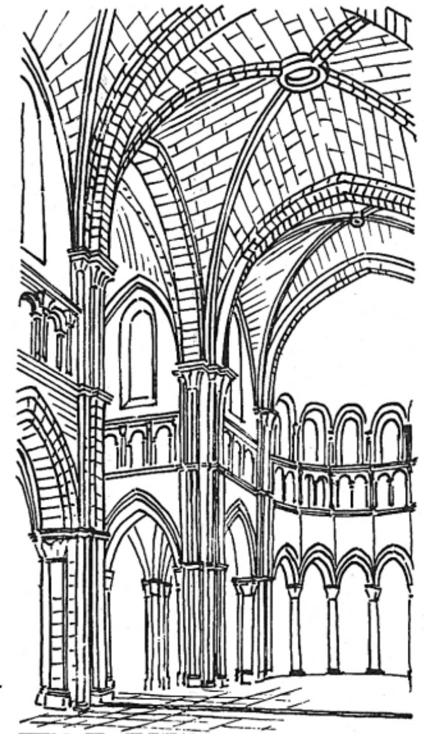


8. Trompa cónica con juntas continuas.



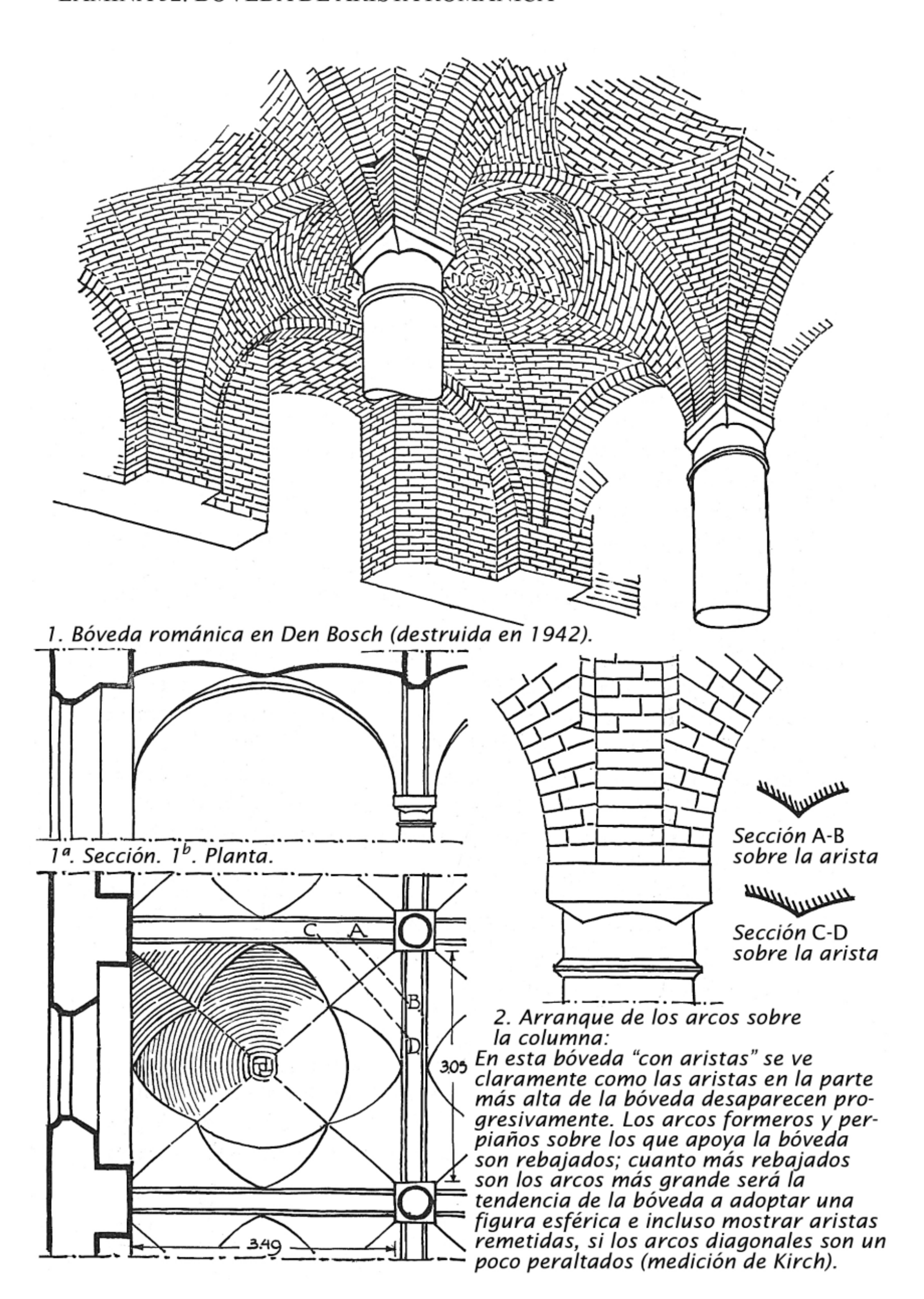
9. Trompa cupuliforme.

(según R. de Lasteyrie)



10. Iglesia en Langres. Bóveda de crucería románica (según Dehio y.v. Bezold).

LÁMINA 52. BÓVEDA DE ARISTA ROMÁNICA



1. Bóveda románica en Den Bosch (destruida en 1942).

1ª. Sección. 1ᵇ. Planta.

2. Arranque de los arcos sobre la columna:

En esta bóveda "con aristas" se ve claramente como las aristas en la parte más alta de la bóveda desaparecen progresivamente. Los arcos formeros y perpiaños sobre los que apoya la bóveda son rebajados; cuanto más rebajados son los arcos más grande será la tendencia de la bóveda a adoptar una figura esférica e incluso mostrar aristas remetidas, si los arcos diagonales son un poco peraltados (medición de Kirch).

Los paños de las bóvedas se tendían a menudo al aire, por ejemplo desde los arcos diagonales hasta los arcos formeros y perpiaños (Lám. 53, fig. 8), con lo que los canteros no se complicaban con la cuestión de si los paños eran o no superficies cilíndricas. Al contrario, buscaron siempre una forma de trabajo fácil y por eso abombaron los paños en todas direcciones.

La construcción abovedada gótica

En el estilo románico se llegaron a tender nervios bajo las aristas en los encuentros de los paños de las bóvedas. Hay una razón técnica: una buena ejecución de estos encuentros ofrece dificultades, puesto que las piezas tienen que acoplarse correctamente entre sí. Resulta difícil, dado que están situadas sobre superficies curvas que se intersecan y se quieren evitar los salientes y cortes agudos. Por otra parte, era completamente lógico colocar un nervio debajo de la arista: proporcionaba una rigidez extra a la bóveda y, además, el peso se podía llevar con más certeza hacia los puntos de apoyo en las esquinas.

En el gótico se desarrolló la técnica del abovedado con nervaduras hasta un nivel hasta entonces desconocido, sobre todo cuando las bóvedas nervadas se combinaron con un bien meditado sistema de contrarresto mediante arbotantes y estribos exteriores.

La bóveda de arista románica conllevaba además una imperfección técnica; el ancho de la nave principal de una iglesia era normalmente dos veces el de las naves laterales. Como las plantas de dichas naves estaban divididas en cuadrados, un cuadrado grande coincidía con dos pequeños. Pero como la carga de las bóvedas de la nave principal venía a descansar sobre todo en las esquinas, en donde se situaban también los pilares principales, los pilares intermedios recibían solamente una pequeña parte del peso.

Esta carga desigual podía originar asientos diferenciales y, además, no era muy económico dejar contribuir tan poco a resistir el peso y el empuje de las bóvedas a una parte de los pilares. En el desarrollo de la arquitectura medieval se observa con claridad el deseo de hacer participar a las columnas intermedias en el apoyo de las bóvedas (Lám. 54, fig. 13–16).

La bóveda sexpartita

En el primer gótico francés las bóvedas de cuatro paños (casi cuadradas) se convirtieron en de seis paños tendiendo un nervio transversal a la dirección de la iglesia en medio de la bóveda cuatripartita (Lám. 54, fig. 10). Éste nervio transversal tuvo una gran importancia constructiva ya que ahora también los pilares intermedios quedaban cargados. Así surgió la bóveda sexpartita.

Fue una mejora, pero no decisiva, puesto que la carga de los arcos diagonales es mayor que la de los arcos transversales; los pilares no reciben todos la misma carga y hay riesgo de asientos desiguales en la cimentación, con el consiguiente agrietamiento de las bóvedas (Lám. 54, figs. 3, 9).

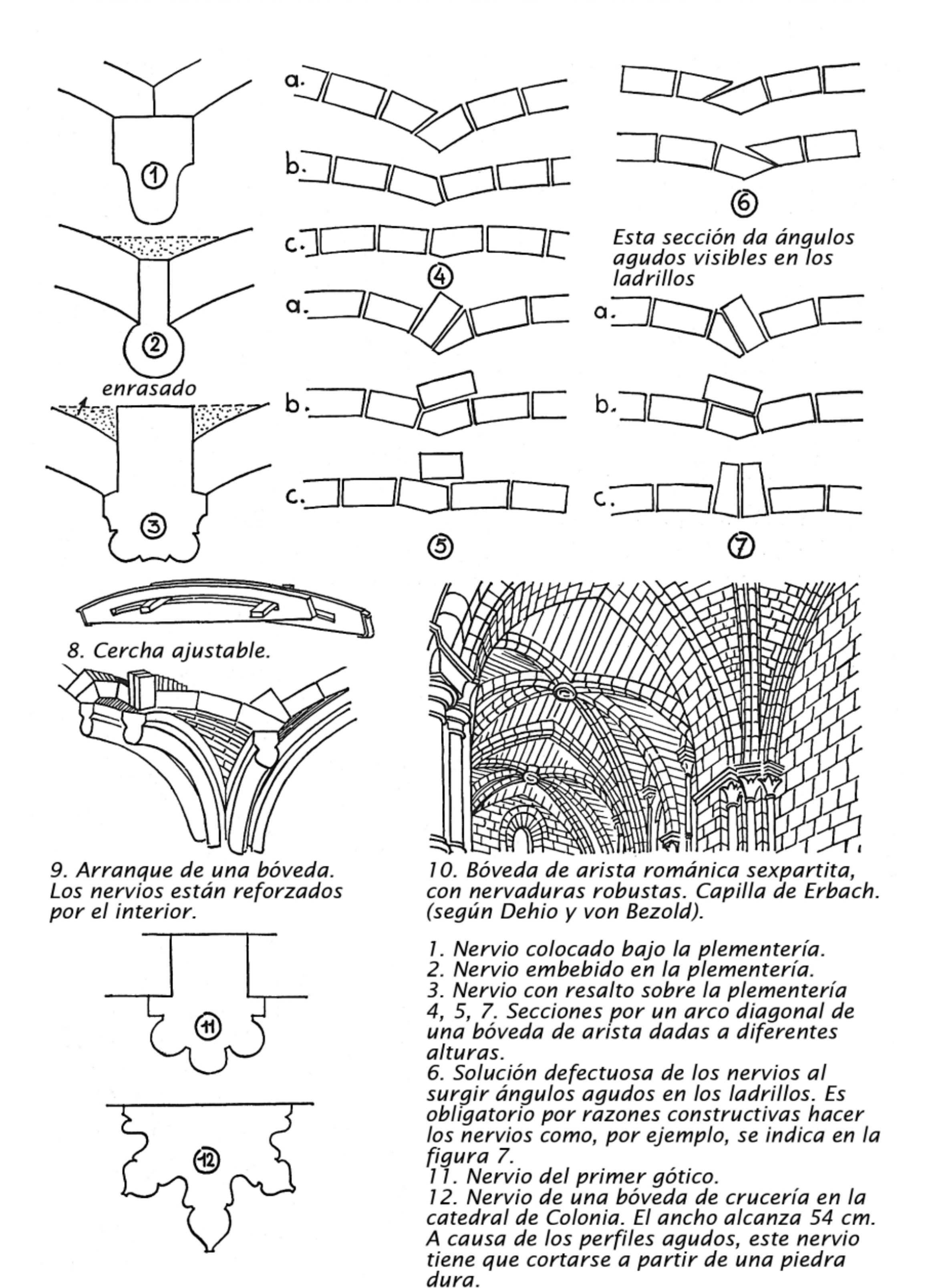
La disposición sexpartita afectaba también a la flexibilidad de la planta, pues obligaba a acompasar cuadrados completos. Esto no encajaba a veces con la longitud de la iglesia, y a menudo sobraba media crujía, llevando al sistema hacia una cierta confusión. La mejora definitiva se obtuvo cuando los paños de las bóvedas de la nave principal en el sentido del eje de la iglesia se hicieron del mismo ancho que los de las laterales. Las bóvedas principales tomaron forma rectangular, siendo la luz doble del ancho.

En el gótico plenamente desarrollado esta forma de abovedar se aplicó de forma generalizada, en Francia; en Inglaterra, sin embargo, partiendo de la misma bóveda, se llegó a formas con nervaduras mucho más ricas (Lám. 54, fig. 13–16).

A los pilares, más cargados, y a los posibles contrafuertes anexos, se les daba una sección mayor. También podía ocurrir que se diera a todas las columnas la misma sección, pero entonces las más cargadas se reforzaban mediante una corona de columnillas adosadas. A veces se sustituían las menos cargadas por una pareja de columnas germinadas más delgadas.

Es interesante la forma en que se solucionó en Notre-Dame de París. Esta iglesia es de cinco naves de modo que hay una segunda columna al lado de la columna de la nave principal. Pero no se reforzó la columna principal, como en la catedral de Bourges, sino la segunda; los constructores partieron de la base de que ambas columnas recibieran el peso juntas, de forma que un refuerzo de la segunda columna hizo más resistente el conjunto.

LÁMINA 53. BÓVEDAS DE ARISTA Y CRUCERÍA. DETALLES DE NERVIOS



8. Cercha ajustable.

9. Arranque de una bóveda. Los nervios están reforzados por el interior.

10. Bóveda de arista románica sexpartita, con nervaduras robustas. Capilla de Erbach. (según Dehio y von Bezold).

1. Nervio colocado bajo la plementería.
2. Nervio embebido en la plementería.
3. Nervio con resalto sobre la plementería
4, 5, 7. Secciones por un arco diagonal de una bóveda de arista dadas a diferentes alturas.
6. Solución defectuosa de los nervios al surgir ángulos agudos en los ladrillos. Es obligatorio por razones constructivas hacer los nervios como, por ejemplo, se indica en la figura 7.
11. Nervio del primer gótico.
12. Nervio de una bóveda de crucería en la catedral de Colonia. El ancho alcanza 54 cm. A causa de los perfiles agudos, este nervio tiene que cortarse a partir de una piedra dura.

En la denominada bóveda normanda se colocó también un nervio en medio de la bóveda cuatripartita a fin de apoyar los paños de la bóveda. Pero como los plementos no arrancan del nervio, éste tuvo poca importancia constructiva (Lám. 2, fig. 19).

La bóveda cuatripartita.

La bóveda cuatripartita tuvo una enorme importancia en el desarrollo de la construcción abovedada gótica. Esto se debe sobre todo a su extraordinaria flexibilidad y a la facilidad con la que se pueden satisfacer todo tipo de exigencias prácticas.

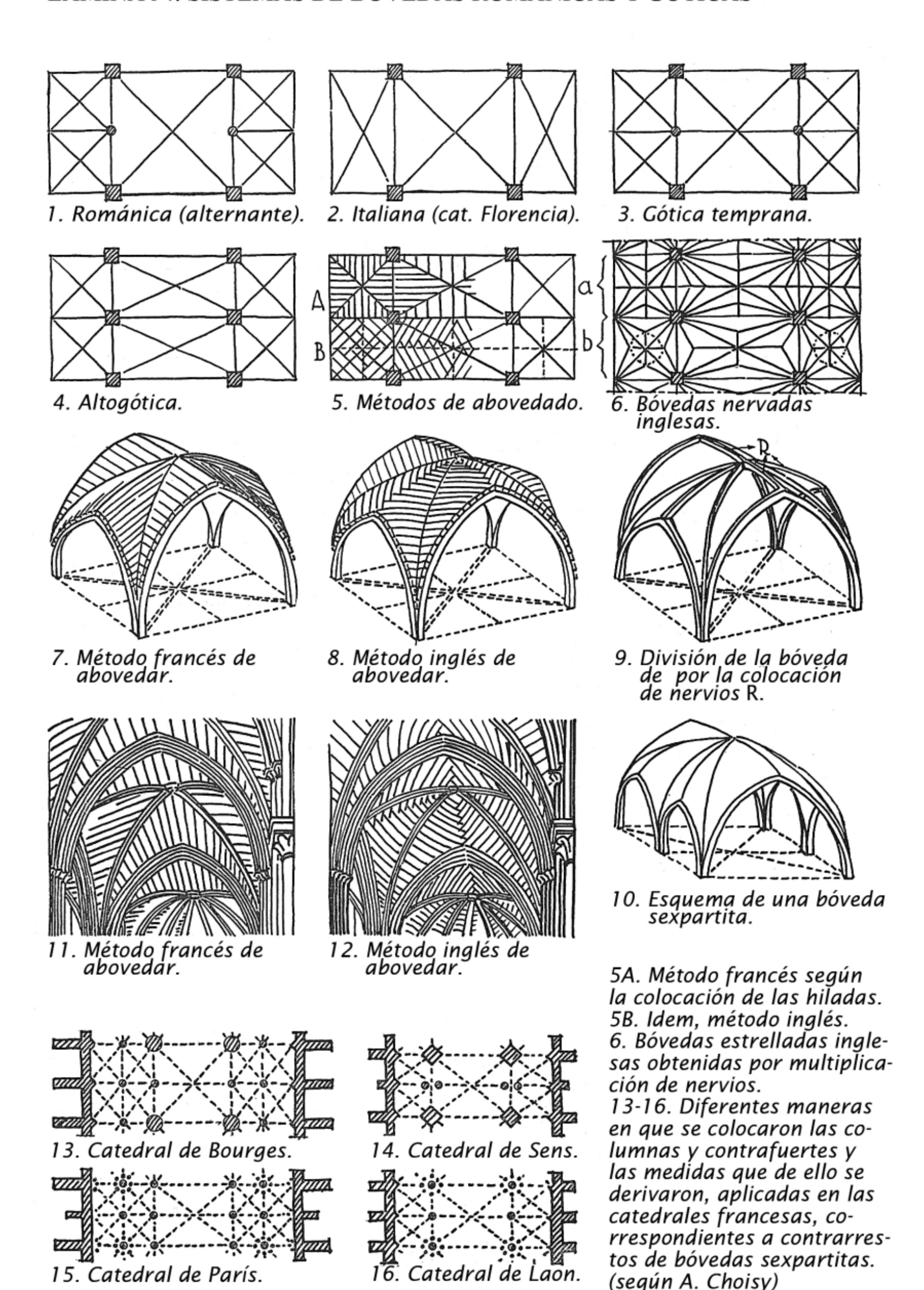
Esta bóveda permite un gran número de variantes. Puede voltearse sobre espacios con plantas cuadradas, rectangulares o de lados desiguales (Lám. 55). La forma no está determinada sólo por los arcos diagonales (Lám. 54, figs. 1–4; Lám. 55, fig. 4), sino también por los formeros y perpiaños, y por la manera de cubrir los paños. Los arcos diagonales pueden ser semicirculares (peraltados o no), escarzanos, carpaneles, apuntados, etc. Los arcos perpiaños pueden ser del mismo tipo, pero también pueden tener formas distintas.

Como frecuentemente se emplearon arcos apuntados, era muy fácil conseguir de manera sencilla la altura deseada. Era también posible hacer uno de los arcos más alto que los otros de forma que el paño ascendiera, lo que alguna vez se hacía necesario, por ejemplo para abrir un hueco de luz elevado en la bóveda (Lám. 55, fig. 2). Las líneas de clave se podían hacer rectas o curvas, y podían discurrir horizontales, o bien ser ascendentes o descendentes hacia la clave.

En el gótico inglés se tuvo preferencia por las líneas de clave rectas a causa del tranquilo efecto que, de esta forma, ofrecía una serie consecutiva de tramos de bóvedas. Se disponía un nervio en la clave de la bóveda uniendo los diferentes tramos y proporcionándoles una suerte de «espina dorsal» (Lám. 63, fig. 6).

Los paños se hicieron con frecuencia abombados; esto último facilitó la ejecución, pues el cantero los podía hacer sin mucha dificultad con una cimbra extensible y ajustable (Lám. 53, fig. 8)

LÁMINA 54. SISTEMAS DE BÓVEDAS ROMÁNICAS Y GÓTICAS



1. Románica (alternante).
2. Italiana (cat. Florencia).
3. Gótica temprana.
4. Altogótica.
5. Métodos de abovedado.
6. Bóvedas nervadas inglesas.
7. Método francés de abovedar.
8. Método inglés de abovedar.
9. División de la bóveda de por la colocación de nervios R.
10. Esquema de una bóveda sexpartita.
11. Método francés de abovedar.
12. Método inglés de abovedar.
13. Catedral de Bourges.
14. Catedral de Sens.
15. Catedral de París.
16. Catedral de Laon.

5A. Método francés según la colocación de las hiladas.
5B. Idem, método inglés.
6. Bóvedas estrelladas inglesas obtenidas por multiplicación de nervios.
13-16. Diferentes maneras en que se colocaron las columnas y contrafuertes y las medidas que de ello se derivaron, aplicadas en las catedrales francesas, correspondientes a contrarrestos de bóvedas sexpartitas.
(según A. Choisy)

En bóvedas de crucería con líneas de clave ascendente, supuestamente recta, se tenía cuidado de que no surgieran salientes hacia el interior, pues se consideraba que procedían un efecto desagradable a la vista. Si no se podían evitar, entonces, se enlucía la bóveda haciendo que en el encuentro de los paños sobresaliera una suerte de nervio de más o menos altura. En la bóvedas abombadas con líneas de clave curvas la formación de dichos salientes hacia dentro escapaba a la atención.

Ejecución de la plementería

En general los constructores franceses construían la plementería de forma diferente a los ingleses. Los franceses prefirieron tomar la dirección de los planos de las juntas paralelos (o perpendiculares) a las líneas de clave de la bóveda de manera que la proyección horizontal de las juntas son líneas rectas que discurren paralelas a las proyecciones de las líneas de clave (o perpendiculares a ellas).

Como se ha dicho, las aristas diagonales son difíciles de hacer por afiladas y angulosas, de manera que es casi inevitable colocar un nervio diagonal.

Los constructores de bóvedas ingleses colocaban, por el contrario, los planos de juntas perpendiculares a los arcos diagonales; éste es el método indicado para hacer bóvedas de arista, aunque en el gótico la mayoría de las veces se emplearon nervios diagonales (Lám. 54, figs. 5^a, 5^b, 7–12).

Con el aparejo inglés se obtiene cierta economía desde el punto de vista del corte de piedras, pues no se tiene que desechar tanto material en la labra. La colocación se hace muy fácilmente hasta la mitad de la bóveda, pero, a partir de este punto, ya no se pueden apoyar las piedras sobre el arco perpiaño y tienen que trabarse entre sí. El cantero se ve obligado a realizar este enjarje en una difícil posición sobre el andamio, por lo que a una ejecución imprecisa se suma una trabazón defectuosa. Por eso se colocaba un nervio en las líneas de clave, para que esta descuidada unión estuviera oculta a la vista. Además, si el nervio se ejecutaba con buenos materiales daba a la bóveda una mayor resistencia y rigidez. Como los paños se hacían más pequeños con esta subdivisión, el espesor de la plementería se podía disminuir proporcionalmente (Lám. 54, fig. 9).

Se prosiguió por este camino y se multiplicó el número de nervios; cada vez se pudo ahorrar más cantidad de material y las plementerías se hicieron más delgadas. Se añadieron nervios transversales que mejoraron el arriostramiento (Lám. 54, fig. 6). En ocasiones, ya no se dejó que los arcos transversales o diagonales cruzaran, y se hizo un variado y decorativo juego de líneas formadas por nervios enlazados entre sí. Así surgieron las bóvedas reticulares, de estrella y de abanico (Láms. 57–67). En el gótico se fue muy lejos en este aspecto, buscando cada vez más efectos decorativos con una devaluación de las exigencias constructivas. Algunas veces plementería y nervio se labraron juntos en una misma piedra, de manera que la bóveda se compuso de placas delgadas de piedra provistas de nervios sobresalientes. El carácter de la bóveda nervada se fue por ello perdiendo aunque los nervios de resalto de las piedras contribuían a la resistencia de la bóveda (Lám. 63, fig. 8).

Los nervios de las bóvedas

La función de Los nervios: Hacia el año 1935 surgió una importante polémica sobre el significado constructivo de los nervios, en la que participaron destacados arquitectos franceses, ingleses y americanos (Lám. 53).

Sobre todo en el aspecto constructivo, los arqueólogos del siglo anterior habían concedido un gran valor a los nervios. El célebre conocedor del gótico, el francés Viollet-le-Duc, formuló esta manera de ver de la forma siguiente: «Las plementerías son solamente el relleno de una estructura formada por las nervaduras elásticas de piedra; los arcos diagonales, perpiaños o formeros no están unidos a los plementos; sólo resisten su peso como si fueran cimbras de madera».

Arquitectos muy dignos de confianza y buenos conocedores de las construcciones góticas, tales como Ungewitter, Deshoulières y otros llamaron la atención sin embargo hacia bóvedas en las que los nervios se continuaban en el espesor total de la bóveda, de forma que la plementería se unía completamente al nervio por medio del mortero formando como si dijéramos una unidad. Se puede, por tanto, poner en duda la declaración del eminente arquitecto y adoptar con toda tranquilidad la opinión de que los nervios no son los únicos soportes de la plementería, puesto que el esfuerzo se repartirá tanto por las nervaduras como por

los paños. Además, los senos de las bóvedas en las esquinas se macizaban hasta una altura considerable (a veces hasta dos tercios de la altura) con lo que la parte de los nervios que podría considerarse como elemento portante se reducía considerablemente.

Por otra parte, las bóvedas medievales antiguas eran frecuentemente muy gruesas. Según Marcel Aubert, como media de 20 á 30 cm, alcanzando en las bóvedas de la catedral de Reims incluso 50 cm, de manera que la masa de la fábrica de la plementería era mucho mayor que la de los nervios.

Otros autores fueron aún más lejos y plantearon la cuestión de si los nervios quizás eran soportados por la plementería. Así, el arquitecto Pol Abraham y el ingeniero Victor Sabouret consideraron muy dudosa la utilidad de las nervaduras.

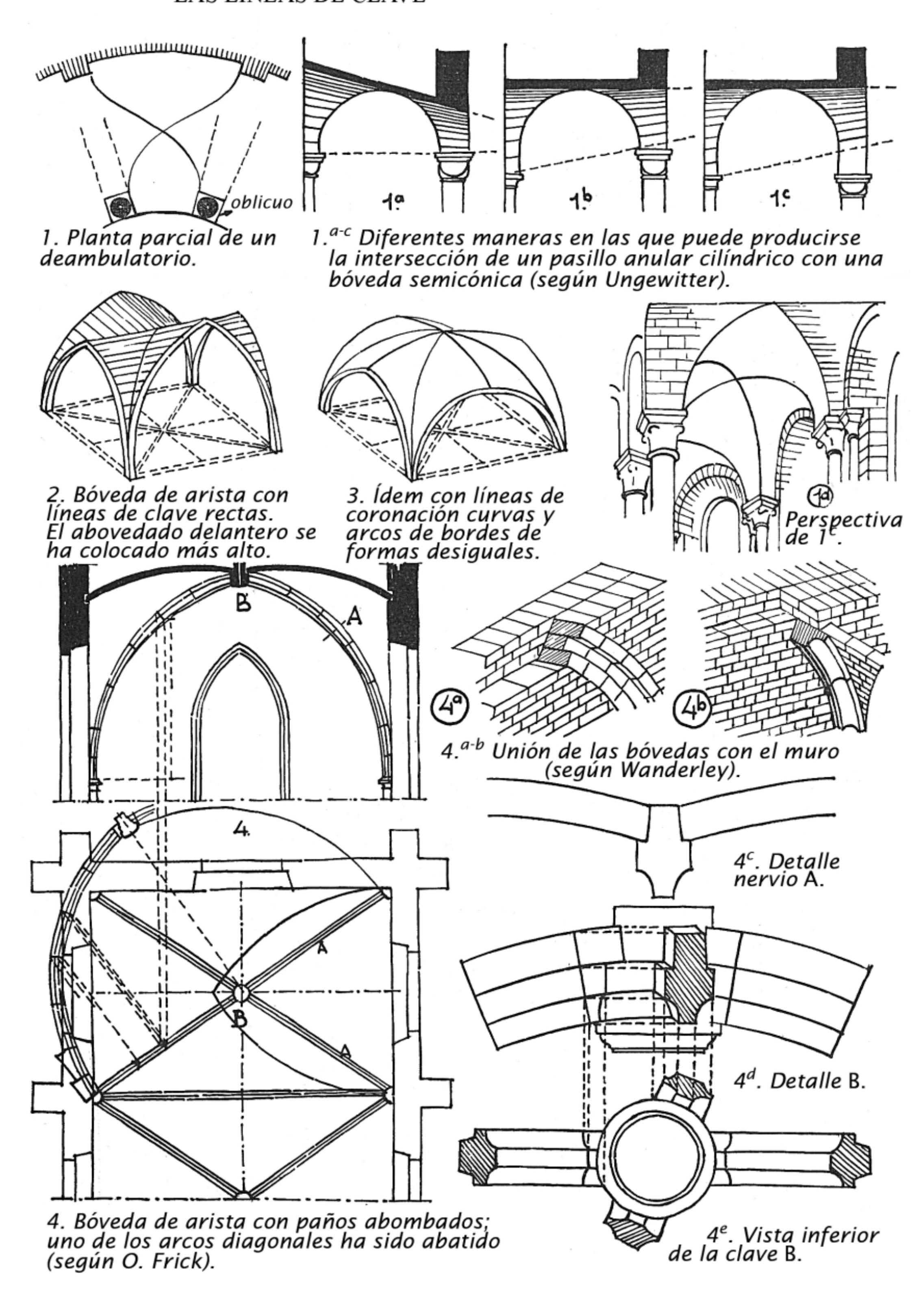
En las últimas Guerras Mundiales se pudo estudiar el comportamiento de bóvedas que habían sido bombardeadas. Se observó que tanto bóvedas en las que los nervios habían sido dañados, como aquellas en las que la plementería había sido destruida, permanecían en pie si la zona dañada no era demasiado grande. Esto indicaría que tanto los nervios como los plementos tenían funciones portantes.

La utilidad constructiva de los nervios ha sido sin duda sobreestimada por los arquitectos del siglo diecinueve, pero no podemos, sin más, dejar de lado sus opiniones. Las nervaduras constituyen un factor esencial para la resistencia de las bóvedas.

Los nervios se hacían la mayoría de las veces de bloques de piedra cortados y especialmente seleccionados, más grandes y pesados que los de la plementería. Su acortamiento era menor y el esfuerzo soportado mayor que el relleno de los paños; es por tanto plausible que los nervios reciban más carga que la plementería. El grosor de las bóvedas era en la zona de las nervaduras mayor que en el resto; la parte superior del ángulo obtuso entre los paños se rellenaba con frecuencia, de manera que también por esta razón, por la mayor cantidad de material, la parte más grande del peso de la bóveda era soportada por los nervios.

El principal papel de los nervios tuvo lugar muy probablemente durante la construcción de las bóvedas, sólo el esqueleto de nervios apoyaba en una cimbra

LÁMINA 55. BÓVEDAS DE ARISTA Y CRUCERÍA MEDIEVALES. TRAZADO DE LAS LÍNEAS DE CLAVE



1. Planta parcial de un deambulatorio.

1.ᵃ⁻ᶜ Diferentes maneras en las que puede producirse la intersección de un pasillo anular cilíndrico con una bóveda semicónica (según Ungewitter).

2. Bóveda de arista con líneas de clave rectas. El abovedado delantero se ha colocado más alto.

3. Ídem con líneas de coronación curvas y arcos de bordes de formas desiguales.

1ª Perspectiva de 1ᶜ.

4.ᵃ⁻ᵇ Unión de las bóvedas con el muro (según Wanderley).

4ᶜ. Detalle nervio A.

4ᵈ. Detalle B.

4ᵉ. Vista inferior de la clave B.

4. Bóveda de arista con paños abombados; uno de los arcos diagonales ha sido abatido (según O. Frick).

digna de tal nombre. Los paños se abovedaban con dos tablas deslizantes una sobre la otra (Lám. 53, fig. 8). Cada paño era prácticamente independiente del adyacente.

Había que tener en cuenta los asientos que pudieran producirse durante el fraguado del mortero de las juntas, y estos asientos fueron asumidos principalmente por los nervios, que, si bien sufrían una pequeña deformación, ésta no producía ningún daño en la plementería. Durante el periodo de fraguado del mortero, que para los morteros antiguos está estimado entre tres y ocho meses, pero que puede llegar a durar años, los nervios aseguraban la estabilidad de las bóvedas, sobre todo debido a que permanecían cimbrados durante un largo periodo de tiempo.

También ofrecen ventajas desde el punto de vista estético, ya que la pureza de forma de las bóvedas es de gran importancia; los nervios ocultan al ojo pequeñas irregularidades surgidas durante la ejecución.

La sección de aristas y nervios: En las bóvedas románicas sin nervios, las aristas formaban en el encuentro entre los paños un borde agudo saliente. Para reforzarlas, se regruesaron en ocasiones por el trasdós. Su ejecución podía hacerse con piedra o ladrillo (Lám. 53, figs. 4–8).

Cuando se ejecutaban en ladrillo, se debía prestar atención a que éstos no tomaran formas agudas. Para ello, había que cortar los picos salientes hacia fuera y dejar pasar los ladrillos de un lado hacia el otro de forma que se mostrara alternativamente un plano cortado cada vez. Como el ángulo entre los paños de la bóveda es más obtuso a medida que se toma la sección en una parte más alta, este corte será más o menos pronunciado.

Si se emplea piedra, la arista se puede hacer de diferentes maneras. La más sencilla es dejar una junta en el plano de la diagonal. Constructivamente, sin embargo, esto no es adecuado pues se forman ángulos agudos en la piedra y se crea una separación en la bóveda justo en la posición en donde debe ser más resistente. Es mejor dejar pasar alternativamente cada una de las piedras hacia el paño adyacente dándoles después un pequeño corte. También se puede, como alternativa, llevar el final de cada piedra hasta el otro paño; esta unión es más firme pero se desperdicia más piedra. Final-

mente, se puede dar a las piedras de la arista forma acodada, con lo que hay que labrar cada piedra. Es un trabajo penoso, y se pierde mucho material.

En el Románico hubo también bóvedas nervadas con nervios robustos, rectangulares o con un perfil moldurado (Lám. 53, figs. 1, 2, 3 y 10). La forma de los nervios sufrió con el paso del tiempo muchas variaciones; en el gótico tardío se les dio perfiles muy afilados.

Normalmente los nervios se hicieron de mejor material que los plementos. Si estos últimos eran de ladrillo entonces se elegía piedra para los nervios (Lám. 53, figs. 11, 12).

Las nervaduras se podían colocar tanto bajo el casco de la bóveda como entre los paños, de forma que el casco ejercía sobre ellos un empuje lateral; a veces sobresalían por el trasdós de la plementería.

La mayoría de las veces se rellenaban los ángulos entre nervios y plementos con argamasa de cascotes. Puesto que la resistencia de la bóveda y consiguientemente también la de los nervios está determinada por la parte más débil, los materiales para los perfiles más agudos debían ser de muy buena calidad; cuanto más delicado y afilado era el perfil más dura tenía que ser la piedra.

Exigencias técnicas y estéticas de los nervios: La ejecución de nervaduras supone una serie de exigencias (Lám. 58):

– debe existir una adecuada proporción entre la longitud y el ancho de las nervaduras. Los nervios demasiado largos podrían quebrarse hacia fuera pero si por evitar esto se hicieran muy pesados, el peso se podría hacer desproporcionadamente grande.
– los nervios se tienen que apoyar bien unos en otros de manera que se mantengan en equilibrio mutuo. Si se juntan nervios largos con nervios cortos en un mismo punto, entonces, es necesario para un buen equilibrio de las fuerzas que los largos se dispongan con más pendiente que los cortos, esto es, que tengan mayor peralte (Lám. 58, fig. 1).
– en la planta se debe tener cuidado de que los nervios se encuentren unos con otros bajo ángulos iguales, de forma que ofrezcan un buen equilibrio de em-

> pujes. En una bóveda estrellada como la de la Lám. 58, fig. 2 los nervios AB y BD se encuentran según un ángulo desfavorable contra el nervio BC. Por eso se prolongan dichos nervios hasta los puntos E y F, con lo que se apoyan mucho mejor unos con otros. Los nervios transversales BE y BF, reciben el nombre de ligaduras.

En una iglesia gótica hay especiales dificultades de cara a determinar la correcta dirección de los nervios en la unión de las naves en el crucero y en la cabecera (Láms. 48–51).

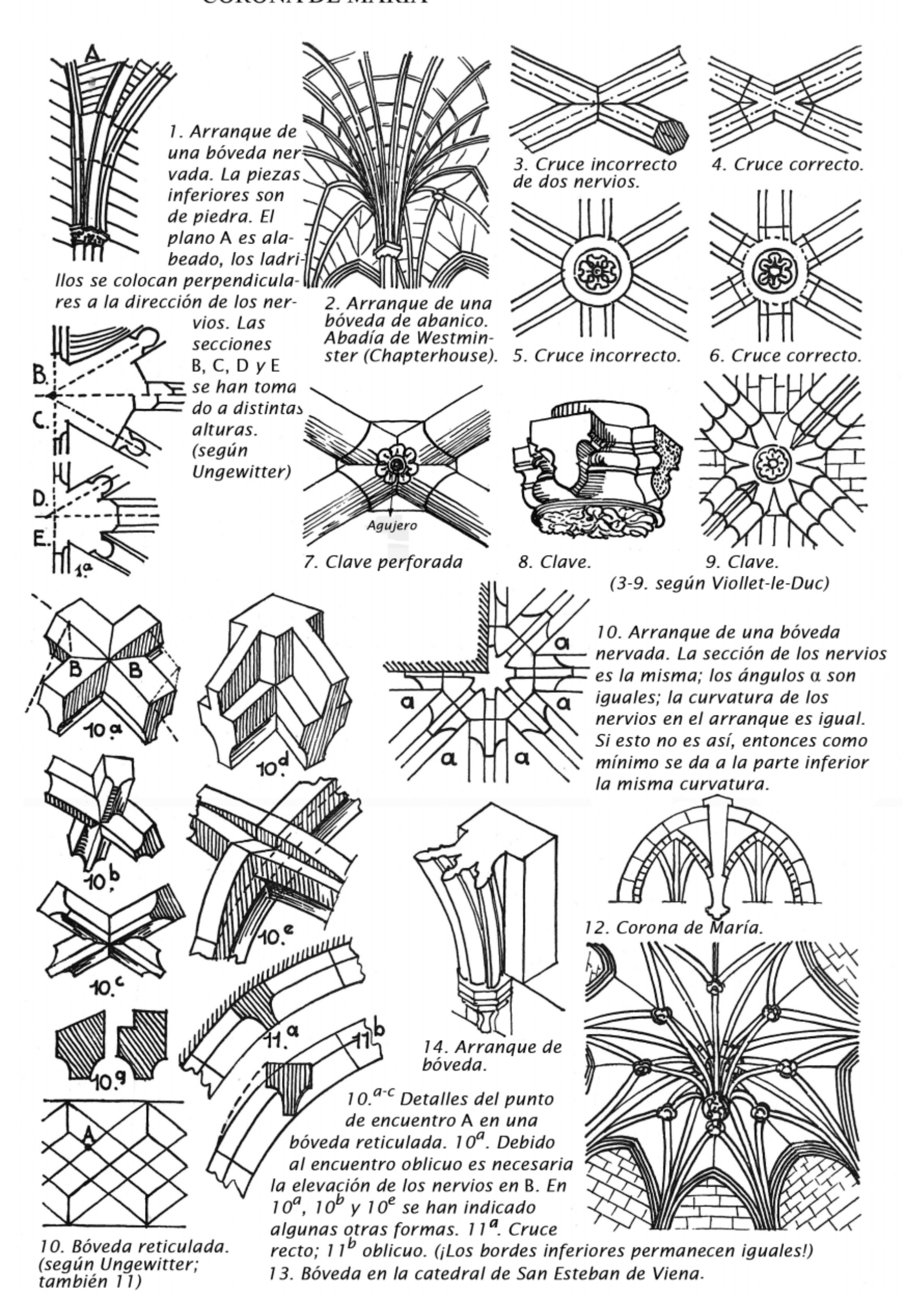
ARRANQUE, ENCUENTRO Y SECCIÓN DE LOS NERVIOS: Por consideraciones estéticas, es deseable que todos los nervios que acometen a un mismo pilar o capitel tengan, en el arranque, la misma inclinación respecto a la vertical (Lám. 56).

En las bóvedas de crucería la satisfacción de esta exigencia deja bastante que desear. La curvatura del arco diagonal era normalmente algo menor que la de los arcos de cabeza, por lo que su arranque era diferente. Para mejorar este feo aspecto se intentaron diferente medios: unas veces, se colocaba el arco diagonal algo más hacia atrás sobre el ábaco del pilar con lo que la desigualdad no se resaltaba tanto; otras, se adelantaban los nervios perpiaños y formeros.

Sin embargo, ambas correcciones no daban una solución satisfactoria. Era mejor, dar a todos los nervios justamente la misma curvatura en la zona del capitel; entonces se podía, algo más arriba, devolver de forma imperceptible los nervios hacia la dirección en la que debían discurrir.

Este último método fue muy utilizado. Los nervios no formaban entonces arcos de círculo perfectos, pero tampoco se pretendía. La cuestión principal no era hacer «líneas matemáticamente exactas», sino construir una bóveda nervada que fuera visualmente buena y aceptable. En el gótico inglés se emplearon generalmente arcos de tres centros (arcos Tudor), con los que era fácil obtener la curvatura deseada. Para estar seguro de una correcta curvatura uniforme para todos los nervios se disponían sobre una superficie cilíndrica o esférica (ver más adelante, p. 190, el apartado sobre la determinación de la forma de las bóvedas nervadas, Lám. 65).

LÁMINA 56. CRUCES DE NERVIOS EN BÓVEDAS GÓTICAS. CORONA DE MARÍA



1. Arranque de una bóveda nervada. La piezas inferiores son de piedra. El plano A es alabeado, los ladrillos se colocan perpendiculares a la dirección de los nervios. Las secciones B, C, D y E se han tomado a distintas alturas. (según Ungewitter)

2. Arranque de una bóveda de abanico. Abadía de Westminster (Chapterhouse).

3. Cruce incorrecto de dos nervios.

4. Cruce correcto.

5. Cruce incorrecto.

6. Cruce correcto.

7. Clave perforada

8. Clave.

9. Clave.

(3-9. según Viollet-le-Duc)

10. Arranque de una bóveda nervada. La sección de los nervios es la misma; los ángulos α son iguales; la curvatura de los nervios en el arranque es igual. Si esto no es así, entonces como mínimo se da a la parte inferior la misma curvatura.

12. Corona de María.

14. Arranque de bóveda.

10.$^{a-c}$ Detalles del punto de encuentro A en una bóveda reticulada. 10^{a}. Debido al encuentro oblicuo es necesaria la elevación de los nervios en B. En 10^{a}, 10^{b} y 10e se han indicado algunas otras formas. 11^{a}. Cruce recto; 11^{b} oblicuo. (¡Los bordes inferiores permanecen iguales!)

10. Bóveda reticulada. (según Ungewitter; también 11)

13. Bóveda en la catedral de San Esteban de Viena.

En Inglaterra, el deseo de hacer en el arranque de la bóveda ángulos de igual magnitud y de formar haces simétricos de nervios condujo a la bóveda de abanico (Lám. 56, fig. 2).

En el cruce de los nervios diagonales, sobre todo en las bóvedas de planta alargada, éstos se encontraban según un ángulo agudo, con peligro de que las piedras pudieran deslizarse hacia fuera. Este peligro se neutralizaba colocando una clave, contra la que apoyaban los nervios (Lám. 56, figs. 3–6). Las claves podían tener un peso considerable; en la nave de la catedral de Winchester (en Inglaterra se las encuentra hasta con dos toneladas de peso).

En las bóvedas reticuladas las claves son necesarias para conseguir una solución razonable de los encuentros de los nervios.

También en los arcos apuntados es necesaria una pesada clave porque la línea de empujes discurre más baja que el vértice de manera que es preciso cargar la clave volviendo así a conseguir que la línea de empujes esté dentro del arco (Lám. 16, figs. 1 y 2).

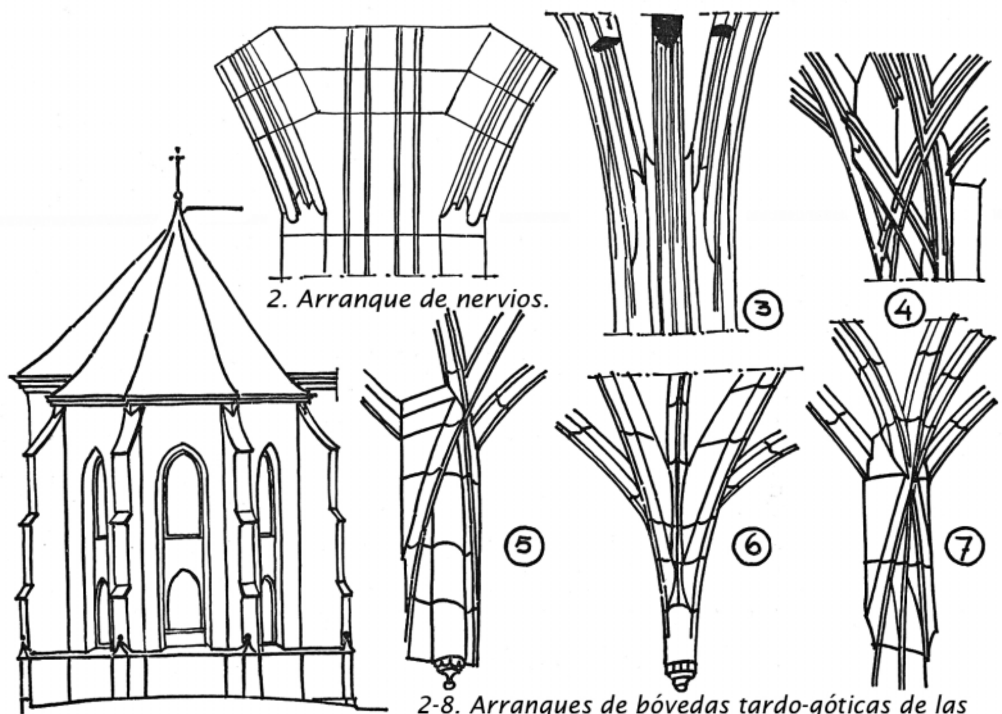
En el gótico tardío los nervios se llegaron a moldurar con gran riqueza. Este moldurado producía problemas ya que los diferentes perfiles tenían que o bien introducirse unos dentro de otros, o bien absorberse en el arranque o en los cruces. Como los nervios se encontraban mutuamente según ángulos diferentes entre sí, aparecían superficies alabeadas (Lám. 56, fig. 1).

Estas dificultades se pueden comparar con las que se han de vencer al realizar escaleras de caracol con una barandilla formada por nervios moldurados.

A veces hubo que modificar in situ los perfiles de los nervios, haciendo su curvatura más pequeña o más grande; otras hubo que interrumpir algunas bandas o dejarlas discurrir. También a veces se dio localmente a los nervios una sección diferente, como se verá más adelante al tratar de la construcción de bóvedas nervadas.

Las dificultades en el cruce de los nervios se solucionaron normalmente con la colocación de una potente clave. Sin embargo había ocasiones en que no todos los nervios podían acometer a la clave. Se realizaban entonces algunos cambios en la sección de los nervios, reduciéndolas o aumentándolas; esto dificultó el corte adecuado de las piedras, pues las distintas secciones debían interpenetrarse o bien quedar absorbidas en los arranques, para conseguir un aspecto razonable.

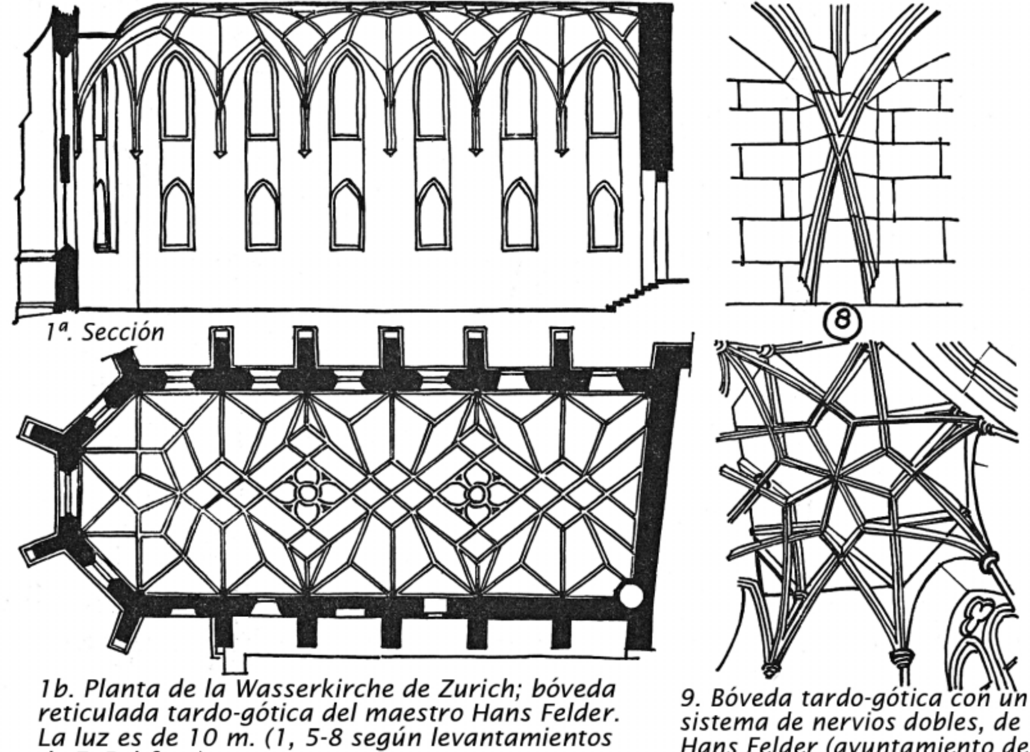
LÁMINA 57. BÓVEDAS NERVADAS DEL GÓTICO TARDÍO. DETALLES DE ARRANQUES



2. Arranque de nervios.

1. Vista del coro con contrafuertes.

2-8. Arranques de bóvedas tardo-góticas de las iglesias de: 2. Berna; 3. Esslingen; 4. Regensburg; 5-8. Iglesias suizas del arquitecto Hans Felder.



1ª. Sección

1b. Planta de la Wasserkirche de Zurich; bóveda reticulada tardo-gótica del maestro Hans Felder. La luz es de 10 m. (1, 5-8 según levantamientos de E. Rehfuss)

9. Bóveda tardo-gótica con un sistema de nervios dobles, de Hans Felder (ayuntamiento de Freiburg).

La clave se cortaba a partir de un bloque rectangular de piedra, y contenía en la parte superior algo de material superfluo. Éste se dejaba tranquilamente sin eliminar; no se tenía que cortar escrupulosamente, podía ofrecer un buen servicio para recibir las partes sobresalientes de los nervios.

Normalmente se dejaban una especie de ménsulas en la piedra de la clave contra las que apoyaban los nervios. Estas ménsulas no tenían por qué ser demasiado grandes, por razones de economía y, también, para evitar posibles roturas (Lám. 56, fig. 8).

A veces en la bóveda se ve colgar una clave con una sujeción invisible; hay en este caso arquillos o bovedillas apoyados contra ella. Es la denominada «corona de María» (Lám. 56, figs. 12 y 13). Un caso digno de mención es, entre otros, el del ayuntamiento de Bruselas, donde sobre la escalera de la entrada una pesada piedra parece flotar en el aire. La solución de este misterio se basa en la construcción de la corona de María. En el gótico inglés este motivo se repitió frecuentemente en la construcción de bóvedas, con hileras de pesados pinjantes de piedra que parecían colgar de ellas (Lám. 64, figs. 4, 5).

El arranque de una bóveda nervada da lugar a diferentes problemas. Los nervios que acometen tienen que recibirse en una pieza de piedra; esta recepción debe tener lugar preferentemente a la misma altura. A un buen arranque de los nervios se le deben plantear las siguientes exigencias (Lám. 56, fig. 10; Lám. 57, fig. 2–8):

- en planta las directrices de los nervios deben cortarse unas con otras en un punto.
- los ángulos entre nervios (en proyección horizontal) tienen que ser iguales entre sí.
- los nervios tienen que tener la misma sección. Si esto no ocurre, que al menos la parte inferior de las secciones sean iguales entre sí. Esto plantea por tanto la necesidad de que los nervios más delgados sean una parte de los de perfil más grueso.
- todos los nervios y arcos deben trazarse, al menos en el tercio inferior de su altura, con el mismo radio; los ángulos que forman con el ábaco del capitel tienen que ser, por consiguiente, iguales.

– la parte más baja de los nervios, los enjarjes, deben ejecutarse, en la medida de lo posible, por grandes bloques de piedra que permite simplificar el moldurado. No se trata de una exigencia absoluta, pero con ello se simplifica la ejecución.
– la construcción de la plementería se facilita si los nervios se hacen independientes a partir de la misma altura, es decir, si acometen separados sobre el arranque.

El crucero

Si se traza sobre el crucero una bóveda nervada, los ángulos bajo los cuales se encuentran los nervios diagonales del crucero y los de la nave no son de la misma magnitud. A menudo, para que dichos ángulos fueran más iguales se trazaba sobre el crucero una bóveda estrellada (Lám. 58, fig. 2, 3).

La cabecera y su unión con las bóvedas de la nave de la iglesia

La ejecución del cierre poligonal de la cabecera, el ábside, se simplificó mediante la aplicación de bóvedas nervadas. El número de lados se hacía por lo general impar para que hubiera un ventanal en el eje de la iglesia. Los contrafuertes se colocaban preferentemente en la dirección de los nervios (Lám. 58).

Como la altura de la bóveda del ábside era igual que la de la nave principal, el último arco perpiaño que no soportaba ninguna carga de fábricas situadas encima, por ejemplo de muros, no podía ofrecer suficiente contrarresto. A veces se hacía algo más gruesa la última bóveda de la nave principal para proporcionar dicho contrarresto.

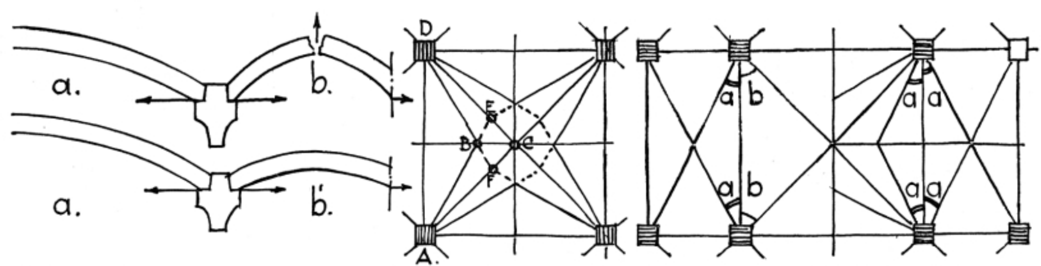
Esto no era, sin embargo, una buena solución. Resultó ser mejor colocar nervios oblicuos en el último vano, que apoyaban contra la clave del arco perpiaño, con lo que el tramo contiguo al ábside se diferenció del resto de los de la nave (Lám. 58, figs. 4–11). Más tarde se llegó a incluir el último vano de la nave en la zona del ábside haciéndose la cabecera más profunda. Los nervios tenían que poder contrarrestarse adecuadamente. Si el último tramo es ancho entonces los nervios se contrarrestan bien (a menos que el ancho sea demasiado grande y por tanto los nervios demasiado largos, con lo que podrían llegar a ser demasiado

débiles), pero entonces su anchura difiere de la de los tramos adyacentes de la nave, lo que no produce un bien efecto. Por otra parte, la forma de los paños de la bóveda de este tramo de la cabecera es diferente de la de los tramos adyacentes. Estos últimos tendrán generalmente la forma de un cono recto mientras que los primeros, o sea, los paños del tramo de la cabecera tendrán la forma de un cono oblicuo. Si el tramo de la cabecera es estrecho, entonces, el efecto de contrarresto de los nervios no será satisfactorio, pues se cortarán en la clave bajo un ángulo demasiado obtuso.

Dado que en el alto gótico hubo cada vez más diferencias entre los anchos de los tramos de la nave principal y los de la cabecera, casi nunca se pudo alcanzar una buena armonía: el mayor ancho de los vanos en el deambulatorio se trasladó al de las bóvedas y los ventanales, perdiéndose el ritmo. Sólo con el empleo de las bóvedas estrelladas y reticuladas se solucionaron, por primera vez, dichos problemas. Estas bóvedas multipartitas permitieron más libertad a efectos del trazado de los nervios que se podían situar de la forma más favorable para resistir el empuje de los nervios de la cabecera poligonal. Además se aproximaron a la solución del problema más complicado: conseguir una mayor unidad en el ancho de los tramos de la nave de la iglesia y el ábside. Se dividía la parte exterior del ábside en un número de vanos iguales entre sí, mayores que los de la parte interior, de manera que se obtenía un ancho uniforme de los tramos en la parte exterior de la cabecera de la iglesia. Este artificio quedaba disimulado mediante el empleo de bóvedas reticuladas (Lám. 58, figs. 10, 11).

Las iglesias de una determinada región muestran en sus bóvedas semejanzas reconocibles, indicando que los constructores partieron de un sistema común considerado óptimo (Láms. 59, 60). Schulze realizó en Suabia una investigación sobre las bóvedas nervadas de más de 70 iglesias de los años 1450-1520, de la que resultó que todas las configuraciones de bóvedas son reductibles a determinadas formas básicas y que su dibujo se podía determinar fácilmente siguiendo las sencillas relaciones geométricas según las cuales habían sido proyectadas. Sobre todo en proyección horizontal resultan estar ligadas a una ley siguiendo el hecho de que los nervios se reflejan acortados en proyección, especialmente hacia los lados, ya que en ellos es máxima la curvatura de la bóveda. Se puede

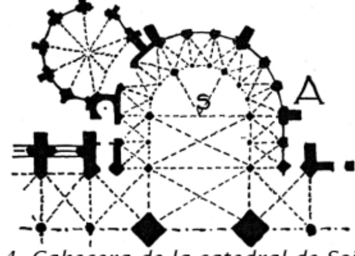
LÁMINA 58. EL CRUCERO Y LA CABECERA EN EL GÓTICO



1. El arco b *ejerce insuficiente contrarresto;* b' *es más rebajado y por ello mejor.*

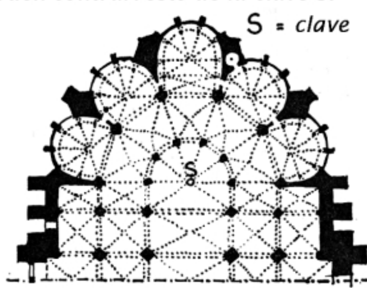
2. Bóveda estrellada, con estabilidad mejorada por los nervios BE, BF.

3. Crucero; equilibrio insuficiente mejorado con el empleo de una bóveda estrellada.

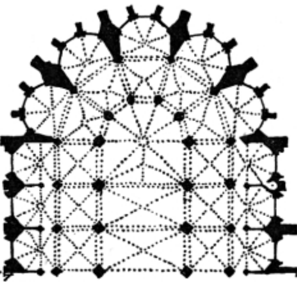


4. Cabecera de la catedral de Soissons. A: *según Viollet-le-Duc, con mal contrarresto en* S. B: *según Dehio y Bezold con buen contrarresto de la clave S.*

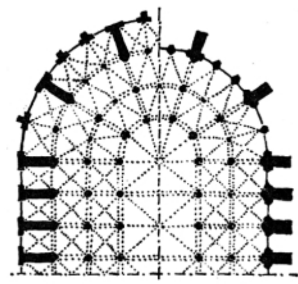
5. Chartres; insuficiente contrarresto de los nervios del ábside en S.



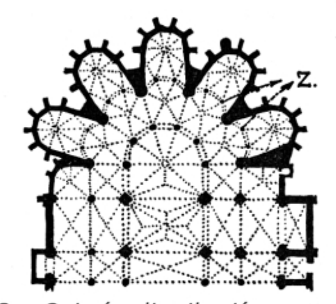
6. Catedral de Reims, buen contrarresto de los nervios del ábside en S.



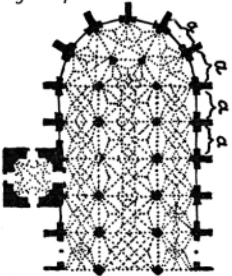
7. Catedral de Narbona, buen contrarresto, pero reparto de vanos desigual; mejor que en Reims.



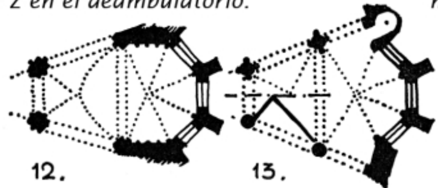
8. Notre Dame de París; buena solución del trazado de la cabecera.

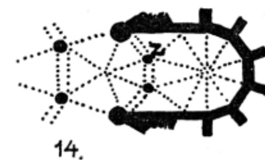


9. San Quintín; distribución regular de bóvedas obtenida mediante la colocación de pequeñas columnas z *en el deambulatorio.*



10. Iglesia en Dinkelsbühl y 11. en Küttenberg. Buena solución de la cabecera con bóvedas reticuladas. Discreta multiplicación del número de vanos del coro, todos del mismo ancho.





12, 13, 14. Detalles de 7, 5, 9 (según Dehio y von Bezold).

deducir casi todo de la proyección horizontal. Con frecuencia, a primera vista no se aprecia ninguna diferencia entre la configuración de dos bóvedas (Lám. 59, figs. 4, 5)

Cuando el entrelazado de los nervios de dos bóvedas es aparentemente igual, entonces la cuestión es determinar el tamaño y proporción de los paños o de las mallas, ya que la mayoría de las veces estos son muy variables, produciendo efectos estéticos diferentes cuyo origen el ojo es incapaz de descubrir.

Schulze hizo un amplio uso de fotografías en su investigación, tomadas en posición central desde el eje de la nave. Todas las líneas horizontales paralelas al eje convergen en cada foto hacia un punto situado en la vertical que pasa por la mitad de la fotografía.

Colocando un plano paralelo al del cuadro pasando por un cierto número de nervios de la bóveda o por sus puntos de coronación se puede obtener directamente por plomadas la proporción exacta de las distancias respectivas de los puntos de coronación en proyección.

Schulze determinó dos tipos principales:

1. Una serie de paños y mallas que se repiten regularmente sin más dibujos decorativos.
2. Bóvedas reticuladas en las que se forma una estrella mediante una serie de paños. Esta estrella puede estar tanto en el medio como en los bordes de la bóveda.

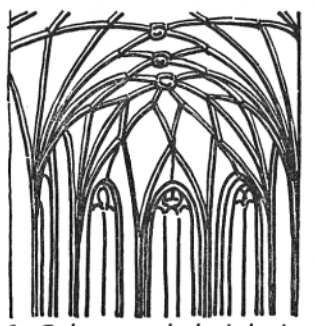
La cabecera se puede también determinar de manera muy sencilla. Se trazan líneas auxiliares bien entre los ángulos de los diferentes tramos, bien desde los ángulos hacia sus puntos medios. Esta líneas auxiliares indican la dirección con la que se pueden trazar los nervios en proyección (Lám. 60, figs. 11–16ª).

De esto resulta una enorme variedad en el dibujo de los nervios. Estos condicionantes no son en absoluto un freno para la libertad del artista o para su fantasía.

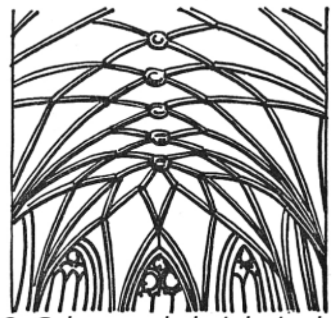
El deambulatorio y su relación con las bóvedas de la nave central y laterales

Cuando se sitúa un pasillo o deambulatorio, con o sin capillas adyacentes, como en la mayoría de las catedrales románicas o góticas, se originan problemas excep-

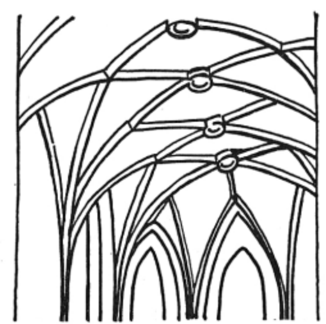
LÁMINA 59. SISTEMAS DE ABOVEDADO DEL GÓTICO TARDÍO



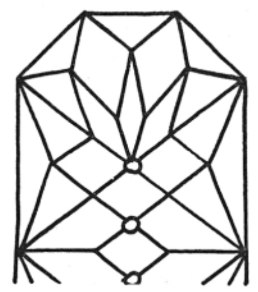
1. Cabecera de la iglesia abacial de Blaubeuren.



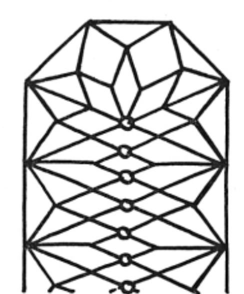
2. Cabecera de la iglesia de Frickenhausen.



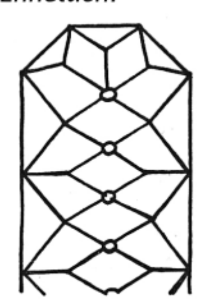
3. Cabecera de la iglesia de Ennetach.



1ª. Planta.

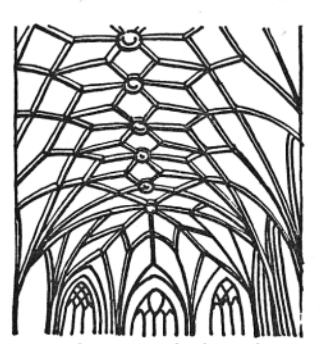


2ª. Planta.

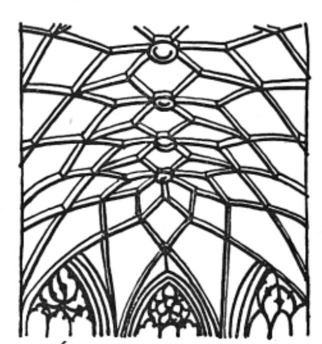


3ª. Planta.

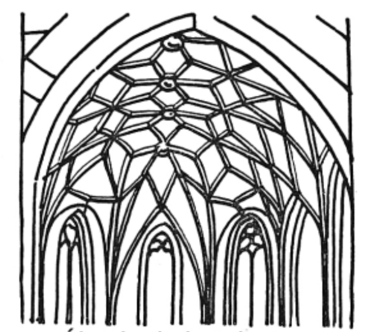
Todas estas cabeceras han sido tomadas de iglesias tardogóticas de Suabia de entre 1450 y 1520.



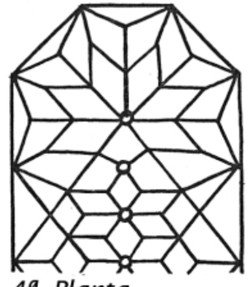
4. Cabecera de la iglesia del hospital de Stuttgart.



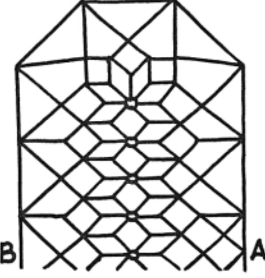
5. Ábside de la iglesia abacial de Weiblingen.



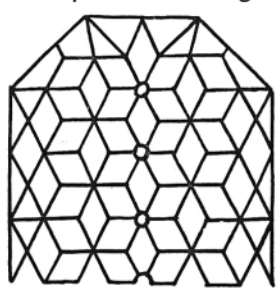
6. Ábside de la iglesia del hospital de Tübingen.



4ª. Planta.



5ª. Planta.
Las bóvedas de luneto en A son más pequeñas que en B.



6ª. Planta.
(Las plantas 1ª-6ª según levantamientos de K. W. Schulze)

cionales. Es especialmente difícil dar una buena solución a las bóvedas sobre todo cuando el deambulatorio es doble, pues, al discurrir en redondo, las bóvedas se ven bajo un ángulo siempre cambiante. Los vanos son en forma de trapecio de forma que tiene lugar una intersección entre un semicono y un semicilindro, que da lugar a líneas de intersección que en planta son líneas curvas. La ejecución de dichas líneas de intersección no era fácil y las piedras de las aristas se tenían que trazar y labrar individualmente.

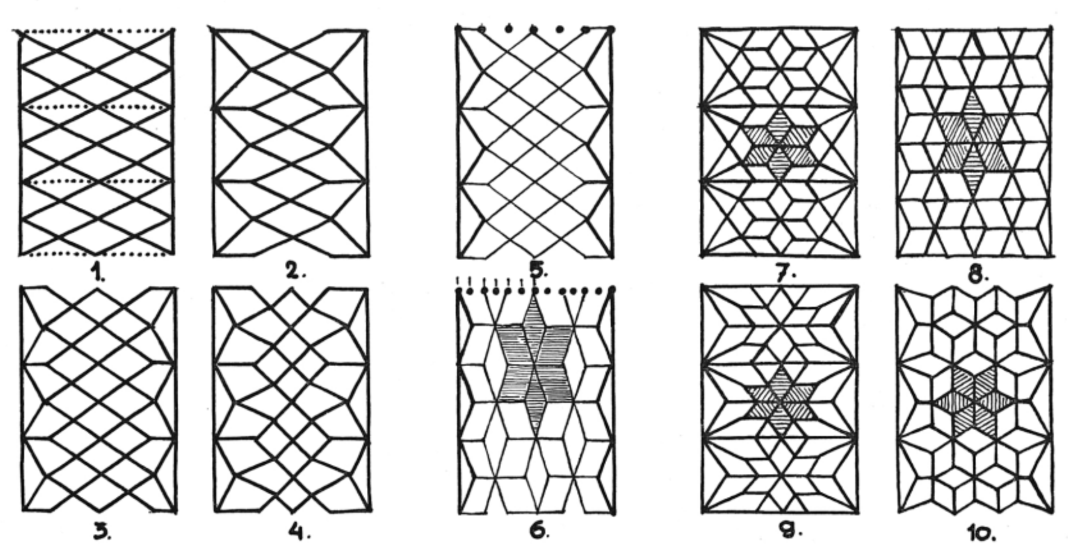
Ahora bien, este semicono se podía situar de tres maneras distintas que determinan su intersección con el semicilindro (Lám. 55, figs. 1ª–1ᵈ):

1) Con una línea de clave inclinada, de manera que los bordes y ejes del cilindro y del cono formaran un plano horizontal. Sin embargo el aspecto de una bóveda de este tipo no es bello.
2) También se puede hacer la clave horizontal colocando algo inclinado el eje del semicono, con lo que los puntos de apoyo quedan a distinto nivel.
3) La tercera y mejor manera para la intersección se obtiene haciendo la coronación horizontal con los puntos de apoyo a la misma altura, dando al arco que descansa sobre el apoyo delantero una forma peraltada. El plano de apoyo de la columna se hacía entonces de forma trapecial en planta para así conseguir una buena unión con la bóveda de forma cónica. Este último método fue muy empleado.

No obstante, se habría llegado antes a un buen resultado si, en lugar de un cono, que termina en un punto, se hubiera tomado otro cuerpo que en lugar de en un punto terminara en una línea recta, esto es, la cuña de Wallis. Sin embargo, ésta comenzó a usarse en la práctica mucho más tarde (Lám. 12, figs. 1–3).

Pero los constructores medievales encontraron la manera de facilitar las cosas. Buscaron la forma de conseguir que, al igual que en las bóvedas de arista cuadradas, las proyecciones de los arcos diagonales en planta fueran líneas rectas. Los paños eran entonces totalmente desiguales. La mejora consistía en trazar los nervios en planta hacia el centro de gravedad del trapecio; después, el tendido de las bóvedas podía hacerse fácilmente (Lám. 58, figs. 12–13).

LÁMINA 60. SISTEMAS DE ABOVEDADO DEL GÓTICO TARDÍO



1-4. Bóvedas reticuladas; 5 bóveda reticulada con lunetos; 6 bóveda reticulada con figura de estrella y lunetos; 7-10 bóvedas reticuladas con figuras estrelladas. También son posibles un gran número de combinaciones y figuras cuando se parte de formas romboidales sencillas. Los nudos se sitúan normalmente sobre una superficie cilíndrica; la sección de la bóveda es entonces una semicircunferencia o un óvalo.

11. 12. 13. 14. 15.

11-14. Diferentes posibilidades constructivas de una cabecera con bóvedas reticuladas-estrelladas.

15ª. Planta.
15-15ª. Cabecera.

16ª 16.

16-16ª. Figuras abovedadas a partir de un octógono.
(1-16 según K. W. Schulze)

La solución utilizada en la cabecera de Notre-Dame de París, es muy bella; los paños de las bóvedas forman en planta triángulos casi iguales, consiguiéndose un reparto armónico y rítmico (Lám. 58, fig. 8).

Técnica y estética en la traza de bóvedas reticuladas, estrelladas, de abanico y aristadas

La tendencia hacia la disminución de los paños de las bóvedas es una consecuencia natural de la puesta en práctica del principio gótico de separar todo lo posible las partes portantes de las soportadas. El sistema de nervios tiende, entonces, a parecerse cada vez más al ramaje de un árbol, que da lugar a dimensiones cada vez más pequeñas.

Como el número de nervios se multiplicó, el relleno de las bóvedas se pudo hacer más ligero, de manera que es comprensible que muchos historiadores del arte atribuyen este desarrollo de las bóvedas nervadas góticas exclusivamente a motivos técnicos.

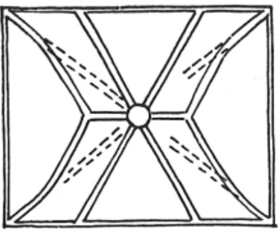
Sin embargo no hay que desconocer que también otros motivos diferentes a los exclusivamente de naturaleza material llevaron a los maestros constructores a cambiar la bóveda cuatripartita por las bóvedas de múltiples nervaduras.

Primeramente en el gótico inglés, más tarde también en el alemán, y finalmente en definitiva en el gótico de toda Europa, se llegó a dar preferencia al uso de las bóvedas estrelladas y reticuladas.

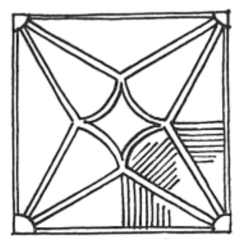
Un interesante ejemplo se encuentra en el transepto norte de St. Jan de Den Bosch. Los constructores tenían inicialmente la intención de cubrir este espacio con bóvedas de crucería (Lám. 61, fig. 1).

En los cuatro ángulos, los arranques de los arcos diagonales se dirigieron hacia los ángulos situados en posición opuesta. Si embargo, gracias al cambio de sensibilidad de los constructores, se colocó sobre él una bóveda reticulada en la que los nervios se arquearon, de forma muy visible, en otra dirección. Las bóvedas sobre los vanos en el lado sur, que datan de una fecha algo posterior, no muestran esa desviación en los nervios, pues fueron proyectadas desde el principio como bóvedas reticuladas. El empleo de este tipo de bóvedas no pue-

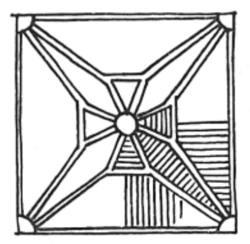
LÁMINA 61. BÓVEDAS ESTRELLADAS Y RETICULADAS



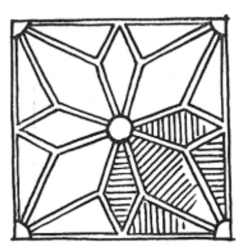
1. Bóveda reticular de la iglesia de St. Jan en Den Bosch; los nervios pensados inicialmente se han punteado.



2. Bóveda estrellada.

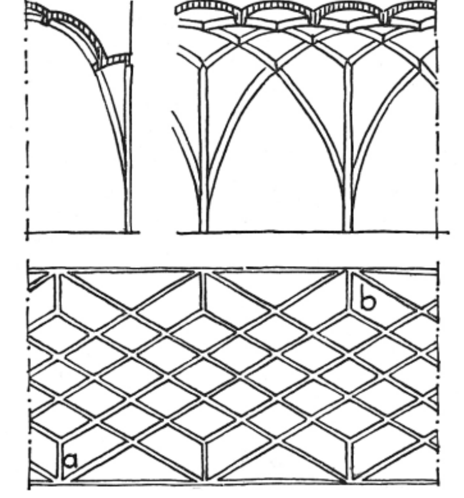


3. Bóveda reticular.

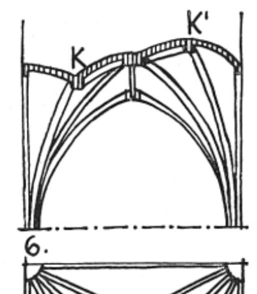


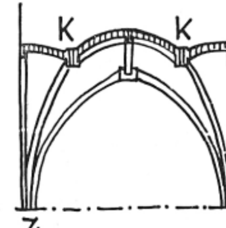
4. Bóveda reticular.

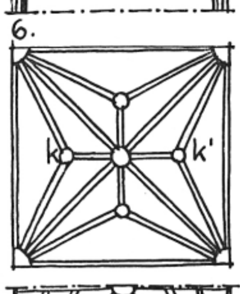
Estabilidad del esqueleto de nervios de una bóveda estrellada. Sea b *= número de nervios,* n *=, núm. nudos, y* a *= núm. puntos de apoyo, para la estabilidad del esqueleto de nervios:* 3(n–a) *debe ser menor o igual que* b.

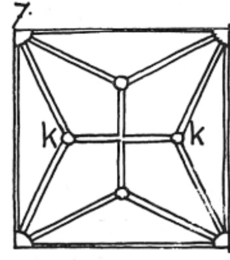


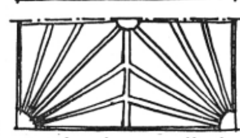
5. Bóveda reticular. Los nervios diagonales han sido eliminados. El nervio a-b *es semicircular. La bóveda es en realidad una bóveda de cañón en la que los nervios yacen sobre la superficie de una bóveda de cañón de forma elíptica. Los paños se han abombado y se separan en mayor o menor medida de dicha superficie.*

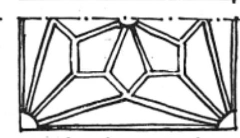






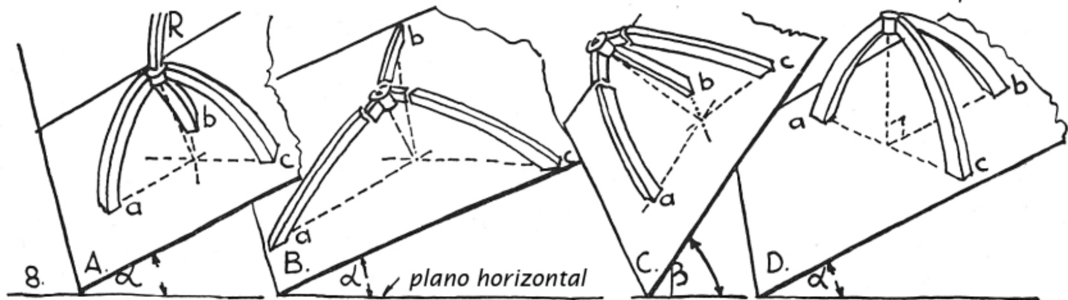






6. Bóveda estrellada; k *puede situarse a diferentes alturas.*

7. Bóveda reticular; k *tiene que situarse a la misma altura a derecha e izquierda.*



8. Diferentes posiciones de un grupo de tres nervios formando parte de una bóveda nervada.
A. Posición segura incluso con la carga del nervio R.
B. Los nervios están demasiado poco inclinados por lo que existe peligro de rotura.
C. El ángulo β *es grande; hay riesgo de rotura por la empinada posición de los nervios.*
D. Dos nervios se encuentran en un plano, perpendiculares al plano horizontal. El equilibrio es inestable.

(5-7 según Ungewitter)

de, pues, atribuirse a motivos exclusivamente constructivos; sin embargo, como ya se discutió al estudiar la disposición de los nervios en las cabeceras, la construcción influyó en la traza de los constructores (Para la diferencia entre bóvedas reticuladas y estrelladas ver Lám. 61.)

La bóveda de abanico surge cuando todos los nervios de la bóveda salen del arranque formando un mismo ángulo (Lám. 63, figs. 5–14). Los nervios se sitúan sobre una superficie de revolución, obteniéndose una disposición regular y un bello discurrir de sus perfiles. Cuando se suprimen completamente los nervios de una bóveda de abanico y la bóveda se ejecuta como un conjunto de superficies de revolución, en forma de embudo o trompeta, unas al lado de otras, surge la bóveda de trompas (Lám. 63, fig. 9). Las bóvedas de abanico y de trompas se emplearon casi exclusivamente en el gótico inglés.

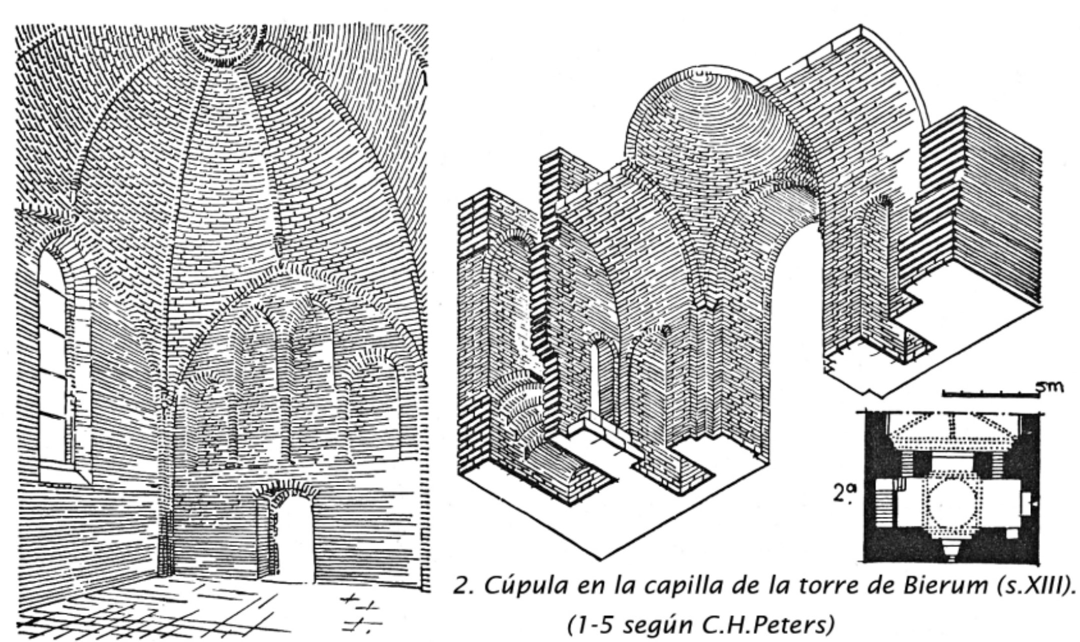
Se pueden hacer bóvedas de múltiples paños con fuertes aristas salientes sin nervios interiores, que toman el nombre de bóvedas aristadas. Las bóvedas aristadas se usaron mucho en la Edad Media sobre todo en las provincias orientales, por lo que también se llaman bóvedas «prusianas» (Lám. 67, fig. 3; Lám. 68).

Para simplificar su ejecución se da a las secciones transversales de las aristas un ángulo constante. Lo más sencillo es hacer este ángulo de 90º, ya que entonces las aristas se pueden construir muy fácilmente con ladrillos normales que se cruzan alternadamente.

En bóvedas cuatripartitas normales los paños llegan a tener mucha altura; las bóvedas aristadas se emplean preferentemente para formar ricas bóvedas estrelladas y reticulares. Cuanto más se dividen los paños, más rebajadas son. Es muy difícil hacer estas bóvedas sin que los ladrillos se tengan que poner irregularmente en los bordes de las celdas; por ello, la ejecución dejando los ladrillos vistos es casi irrealizable y el enlucido de yeso es casi imprescindible.

La fantasía de los arquitectos medievales no les llevó nunca a concebir todas las variaciones para el proyecto de las diferentes bóvedas nervadas aquí aludidas. En las bóvedas reticulares se prescindió a menudo de los arcos transversales y diagonales, de forma que sobre la bóveda aparece una red de rombos que a veces alterna con figuras rectangulares y trapeciales. También se combinaban diferentes clases de bóvedas entre sí, de manera que la parte más alta constaba de trián-

LÁMINA 62. BÓVEDAS MEDIEVALES NEERLANDESAS



2. Cúpula en la capilla de la torre de Bierum (s.XIII).

(1-5 según C.H.Peters)

1. Bóveda cupuliforme en la iglesia de Woldendorp (siglo XIII).

3. Sección A-B de la iglesia de Loppersum.

4. Sección longitudinal parcial de la iglesia de Loppersum.

5. Ménsulas de arranque en la iglesia de Loppersum.

3ª. Planta de la iglesia de Loppersum. Los pies de la nave principal se cubren con una bóveda estrellada-reticular llamada por los lugareños la red de San Pedro. Sobre ambos brazos de la cruz hay bóvedas nervadas cupuliformes, mientras que el resto de la nave y la cabecera se cubren con bóvedas de crucería. La bóveda reticular es de la segunda mitad del siglo XV.

gulos que apoyaban sobre figuras rómbicas, ocurriendo también lo contrario (Láms. 57–70).

Diferencia entre bóvedas reticuladas y estrelladas

Hay una diferencia principal entre las bóvedas reticuladas y las estrelladas. Una bóveda estrellada consta de un conjunto de triángulos, con lo que el sistema de nervios es indeformable; una bóveda reticular por el contrario tiene un sistema de nervios deformable, que se convierte en rígido por medio de la plementería (Lám. 61, figs. 2–4).

Estas bóvedas nervadas son comparables a entramados espaciales. Se puede calcular directamente si una bóveda es estable o inestable: se toma el número de nudos *n,* el número de puntos de apoyo *a* y el número de nervios *b;* entonces 3(*n–a*) debe ser menor o igual que *b.* (En un entramado espacial de barras podemos poner una condición análoga a la aquí establecida.)

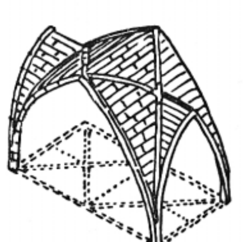
En una bóveda estrellada se tiene la libertad de situar uno de los puntos de cruce más alto o más bajo, porque el equilibrio es estable; en las bóvedas reticulares esto no se puede tomar como regla, ya que pueden surgir peligrosos hundimientos en las bóvedas (Lám. 61, figs. 6, 7).

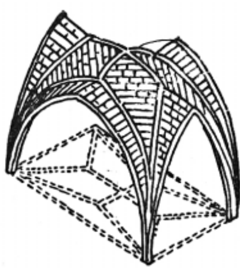
La construcción de bóvedas nervadas

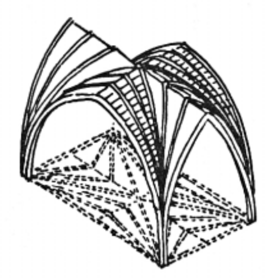
En el proyecto de bóvedas como las antes descritas, es aconsejable partir de formas muy sencillas. No puede haber ninguna arbitrariedad en la determinación del discurrir de los nervios que está ligado a un determinado sistema. Por ejemplo, en una bóveda estrellada, los ángulos entre los arcos diagonales y los arcos formeros y perpiaños se pueden subdividir y conseguirse la forma necesaria por consecutivas subdivisiones de los ángulos.

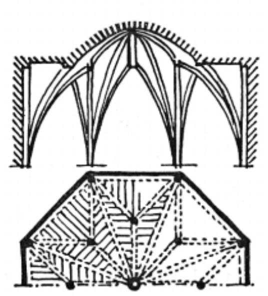
En general, la puesta en práctica consecuente de un determinado principio da los mejores resultados. En el gótico tardío se desviaron a menudo de estas sencillas reglas: se dio también a los nervios una forma curvada en planta, situándose en la bóveda girados en diferentes direcciones, lo que no redundaba a favor del aspecto externo. Además, esto conllevó problemas de índole constructiva, ya que la cimbra de los nervios durante la ejecución debía, así mismo, tener una forma con doble curvatura (Lám. 70).

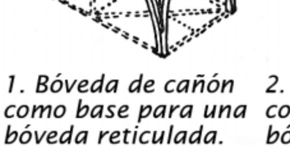
LÁMINA 63. BÓVEDAS RETICULADAS, ESTRELLADAS Y DE ABANICO









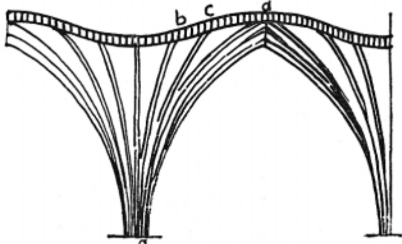


1. Bóveda de cañón como base para una bóveda reticulada.

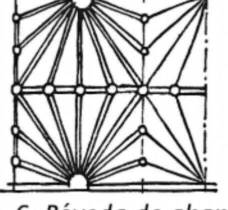
2. Bóveda cupuliforme como base para una bóveda reticulada.

3. Bóveda de crucería como base para una bóveda reticulada.

4. Bóveda reticulada en forma de cúpula peraltada.

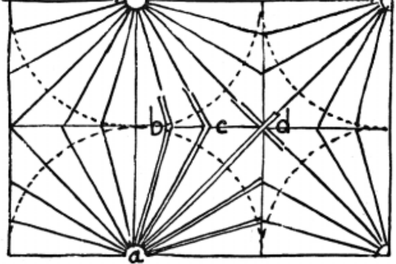


5. Vista de bóveda de abanico; línea de clave arqueada; ab, ac, ad, *de longitudes diferentes.*





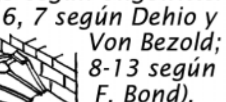
6. Bóveda de abanico con línea de clave recta (según Dehio).



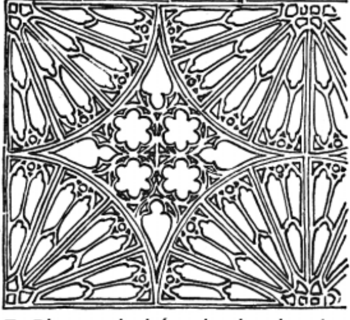


5ª. Planta.

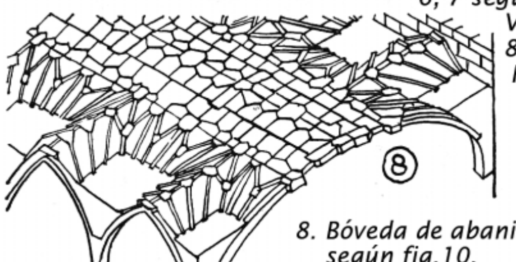
5, 6, 7. Se aspiró a la consecución de una línea de clave recta. Se aproximaron a ello haciendo el arco diagonal ad *de medio punto (5ª). Se alcanzó con nervios compuestos de dos arcos diferentes, o como se indica en figs.7 y 13. (5 según Ungewitter;*



6, 7 según Dehio y Von Bezold; 8-13 según F. Bond).

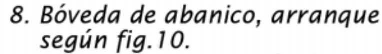


7. Planta de bóveda de abanico.

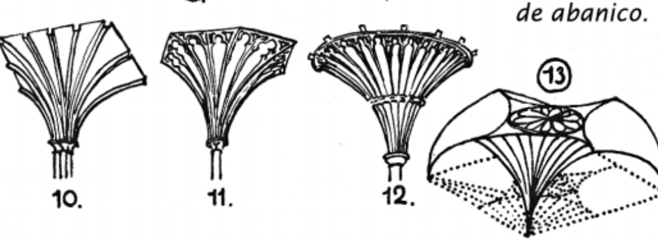


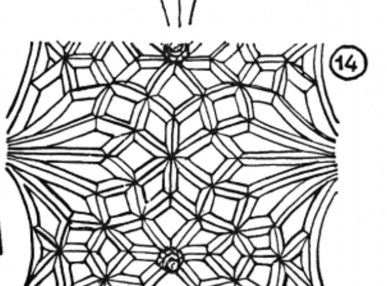
8. Bóveda de abanico, arranque según fig.10.

9. Idem, arranque según fig.12.



13. Perspectiva de una bóveda de abanico.





La posición de las cimbras jugó por tanto un gran papel en la ejecución de las bóvedas (Lám. 74, fig. 12).

En una bóveda reticulada o estrellada las cimbras se pueden poner de dos maneras (Lám. 56, figs. 11[a], 11[b]). La primera, perpendicular a la superficie de la bóveda. Esta manera tiene claras ventajas puesto que las secciones de los nervios se pueden determinar de forma muy sencilla. Las cimbras se pueden colocar en diferentes direcciones, dependiendo de la curvatura de la bóveda; no se sitúan por tanto, salvo por casualidad perpendiculares al plano del suelo. Pero si la mayoría de las cimbras se tienen que colocar oblicuas respecto al plano del suelo, esto no es fácil de realizar para los carpinteros; las cimbras casi no se pueden mover y ¡cuán difícil es el trabajo de carpintería que ha de realizarse para su montaje! Por este motivo, sólo se colocan de la primera forma cuando las bóvedas se apoyan sobre una cimbra que también discurre bajo los paños, por ejemplo en el caso en bóvedas pequeñas, ornamentadas y sobre todo engalanadas con una rica decoración.

Por lo general se prefirió la segunda manera, es decir colocando las cimbras perpendiculares al plano del suelo, teniendo que aceptar entonces, la siempre complicada ejecución de los cruces de los nervios. Que dichos cruces son más difíciles de hacer se desprende del hecho de que los nervios se cortan entre sí a diferentes alturas, al estar situados en distintos planos; la consecuencia es que deben hacerse adaptaciones y transiciones. En los cruces se intentó, en la medida de lo posible, superar los inconvenientes colocando grandes claves. La mayoría de las veces las aristas inferiores de los perfiles se mantenían a la misma altura, se subía una o las dos aristas de uno de los nervios en el cruce o se colocaba un nervio más ancho; todo tipo de trucos, por tanto, para hacer la unión de los nervios cruzados entre sí tan regular y bella como fuera posible (Lám. 56, figs. 10[a]–10[g]).

En casi todas las bóvedas nervadas múltiples se puede partir de una de las siguientes formas principales (Lám. 63, figs. 1–4):

– de una bóveda de cañón con lunetos.
– de una bóveda de crucería cuatripartita. (En el arranque se hace surgir un número mayor de nervios.)
– de una superficie de revolución o de una cúpula, sobre la que se disponen las nervaduras.

LÁMINA 64. FORMAS ABOVEDADAS TÍPICAMENTE GÓTICAS

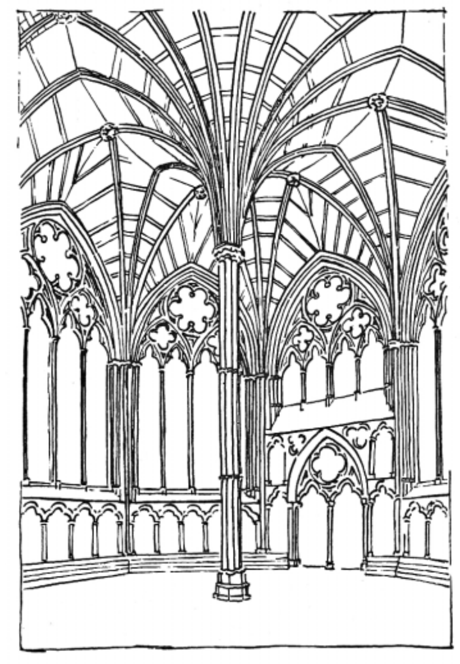
1. 20 m

2. 20 m

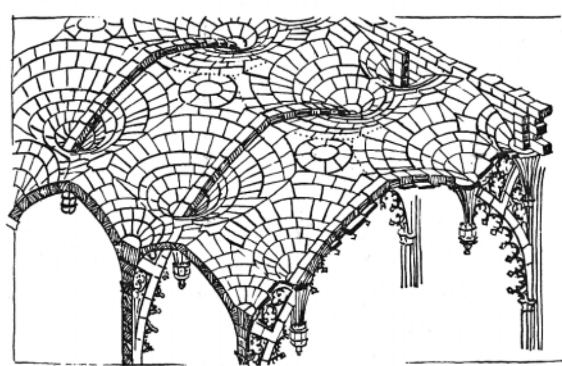
20 m

1ª. Planta (1-2ª según G.F. Seidel) 2ª. Planta

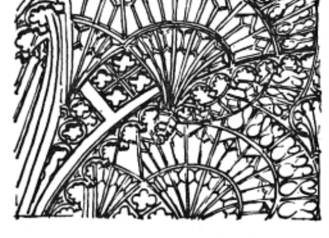
1. Primer proyecto para el abovedado de la iglesia abacial de Ettal (Baviera).
2. Segundo proyecto. Esta bóveda muestra gran semejanza con la de fig. 3.



3. Bóveda de la sala capitular de la abadía de Westminster (según W. S. Weatherley).



4. Construcción de una bóveda en la capilla de Enrique VII de la abadía de Westminster de Londres (según F. Bond). Los pinjantes están soportados por arcos apuntados. La bóveda conoidal tiene su apoyo en la mencionada piedra de la clave.



5. Vista inferior de la bóveda de fig. 4.

En el gótico los maestros se permitieron todo tipo de libertades. Disponían de una gran experiencia, indispensable para saber cómo se tenían que trazar los nervios en planta de forma que dieran una buena impresión a la altura de la bóveda. En efecto, a partir de un dibujo regular en planta se podía llegar a construir una bóveda con nervios en disposición oblicua y aspecto desagradable.

Por eso no bastaba nunca con el dibujo de algunas proyecciones, sino que cuando era posible se hacía un modelo a pequeña escala en arcilla o cartón, sobre todo si se había proyectado una bóveda de la que no se podía estar completamente seguro y acertado a juzgar por las proyecciones.

La determinación de la forma de las bóvedas nervadas

Normalmente se empieza con el dibujo en planta en el que se indica el discurrir de los nervios, la «montea». Después, se decide la forma de los arcos diagonales y de cabeza, siempre teniendo en cuenta que se ha de lograr una forma de bóveda que sea lo más adecuada posible tanto en el aspecto estático como en el estético. Después de determinar la forma principal se fijan en ella las diferentes claves (Lám. 65).

La bóveda nervada tiene que estar proyectada de forma que los nervios se mantengan entre sí en equilibrio sin ayuda de la plementería. Esta última da una mayor seguridad, que es de agradecer, pero no podemos contar con ella.

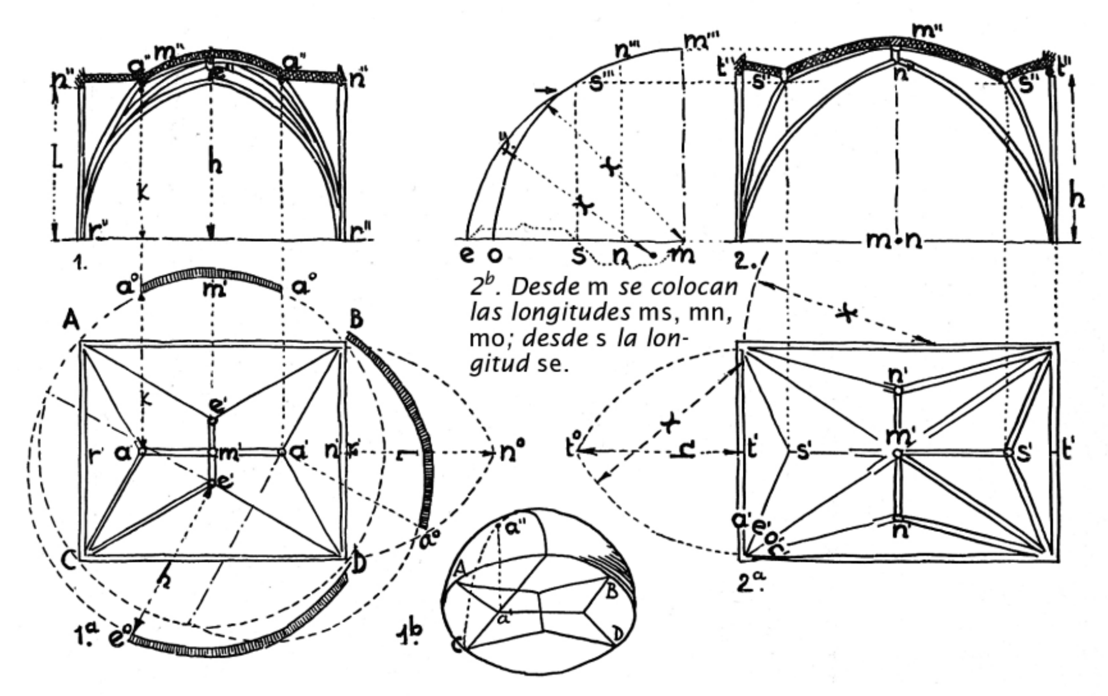
Si los nervios yacen sobre una superficie que está curvada en todas direcciones, por ejemplo un paraboloide o una semiesfera, se puede aceptar que se apoyan los unos con los otros suficientemente.

Se debe prestar atención a los puntos ya indicados: que los nervios en el arranque salgan en la medida de lo posible bajo el mismo ángulo medido con respecto a la horizontal, y que al menos en el arranque su pendiente con la horizontal sea la misma en todos los nervios.

Hay algunos métodos y formas usuales para el proyecto de bóvedas nervadas; el uso de tales procedimientos se atribuye también a los maestros constructores góticos.

El primer método es que todos los arcos se sitúen sobre una esfera, una superficie de revolución o sobre otra superficie curva que presente líneas de clave

LÁMINA 65. LA CONSTRUCCIÓN DE BÓVEDAS RETICULADAS Y ESTRELLADAS



Método 1. (figs. 1-1^b)

Sobre la planta rectangular de la bóveda reticulada se ha circunscrito una semiesfera. Se puede elegir libremente la altura de los arcos de cabeza. Se colocan sobre planos verticales por los nervios (en planta) que cortan a la semiesfera. Los nervios son porciones de las líneas de intersección. Los arcos resaltados en fig.1ª muestran los nervios en forma y altura. (medidos desde las líneas en planta). Están situados sobre la semiesfera (ver fig. 1^b).

Método 3. (fig. 3)

Se traza el arco principal con un radio igual al segmento e's'+s'm' *(fig. 3). Se adopta para ello una semicircunferencia con lo que el arco diagonal se convierte en apuntado* (o'm'').

Los arcos de cabeza se hacen apuntados; se trazan, por tanto, con un radio menor. Este método parece atractivo para la determinación de la forma de nervios en bóvedas sin arcos diagonales, pero se tiene que aplicar con cuidado y se debe controlar continuamente si aparecen descensos en las claves.

Método 2. (figs. 2-2^c)

Se toma una semicircunferencia de radio = x *(fig. 2^b) para el arco diagonal. Todos los arcos se trazan ahora con el mismo radio* x. *Para el nervio* s'm' *se tiene cierta libertad, se puede también situar* s' *más bajo que lo que aquí se ha hecho. El nervio* e's' *está totalmente determinado si el punto* s' *esta fijado, puesto que este nervio se determina por un arco con radio* x *que une* s *con* e *(fig. 2^b arco* e's'*). La altura de los arcos de cabeza se toma arbitrariamente. Este método tiene el inconveniente de que el nervio* e's' *tiene en el arranque una inclinación distinta que el arco diagonal. Esto ha sido solucionado en fig. 2^c.*

Se traza el arco e's'' *con radio* x *y se sitúa el centro de dicho arco sobre la línea* e's'. *De la misma manera se traza el arco diagonal* o'm'.

El punto m'' *se sitúa por tanto a una altura* x *sobre la línea del suelo y a una distancia* s'm' *de* s''.

El arco s''m *con radio =* x *da la forma del nervio* s'm'. *Las claves* s' *y* n' *vienen a estar ahora algo más altas que en la construcción 2^b. Si en bóvedas pequeñas los arcos de cabeza son demasiado altos, se pueden trazar con un radio más pequeño.*

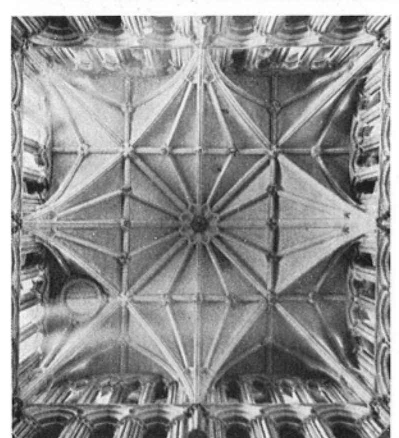
curvadas. Todos los nervios deben yacer sobre la superficie elegida. Si se toma una semiesfera, entonces, se puede colocar un plano vertical que pase por la proyección horizontal de cada nervio, cuya intersección con la esfera proporciona la verdadera posición y forma del nervio; el centro del nervio se sitúa en el plano horizontal de los arranques y los radios con los que se trazan los diferentes nervios no tienen por qué ser iguales (Lám. 65, fig. 1).

Una segunda forma está relacionada con la anterior. Para el arco diagonal se adopta un arco determinado, sea apuntado, circular o carpanel; este arco se toma como el arco principal. De este arco se obtienen todos los otros arcos, que se trazan todos *con el mismo radio*. Este método, en el que se hace uso del llamado «arco principal», tuvo una extensa aplicación (Lám. 65, fig. 2). En bóvedas alargadas puede ocurrir que los arcos apuntados lleguen a ser demasiado altos; entonces se tiene que buscar de alguna forma que los puntos del trazado estén más bajos. No se debe olvidar sin embargo que dichos métodos son medios auxiliares. Los maestros medievales quizás hicieron uso de ellos pero, en cualquier caso, los emplearon con mucha libertad. Frecuentemente no se puede asegurar que siguieran un sistema en concreto.

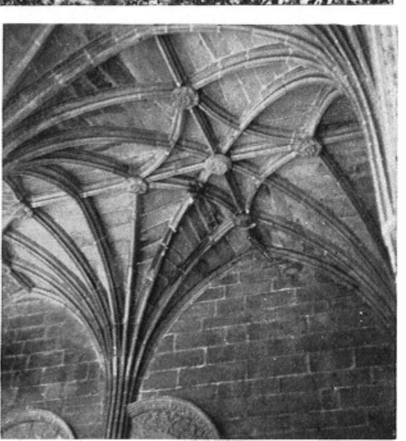
Una tercera forma, también atribuida a los constructores medievales, es la determinación de los nervios según un arco principal, obtenido de la siguiente manera. Se colocan sobre una línea recta, una tras otra, las longitudes proyectadas en planta de los nervios consecutivos. Se empieza en el arranque y se continúa hasta la mitad de la bóveda trazándose sobre ella el arco principal. La medida del radio del arco principal no se obtiene, por tanto, por la proyección de dicho arco, sino por las proyecciones de los arcos partidos colocados uno tras otro, ver Lám. 65 (la fig. 3 tiene que verse conjuntamente con la fig. 2ª). En la figura 3 se han colocado una tras otra las proyecciones de los nervios *es* y *em* correspondientes a la planta de la fig. 2ª. La altura del punto de coronación *s* sobre el arranque de la bóveda se deduce de la fig. 3; ésta es igual a *ss'*.

No es necesario que el centro con el que se traza el arco principal se sitúe en *m*. Desplazándolo algo a la derecha o hacia abajo, se cambia la altura del arco principal y por tanto también la del punto de coronación *s'*, con lo que se modifica también la forma de la bóveda.



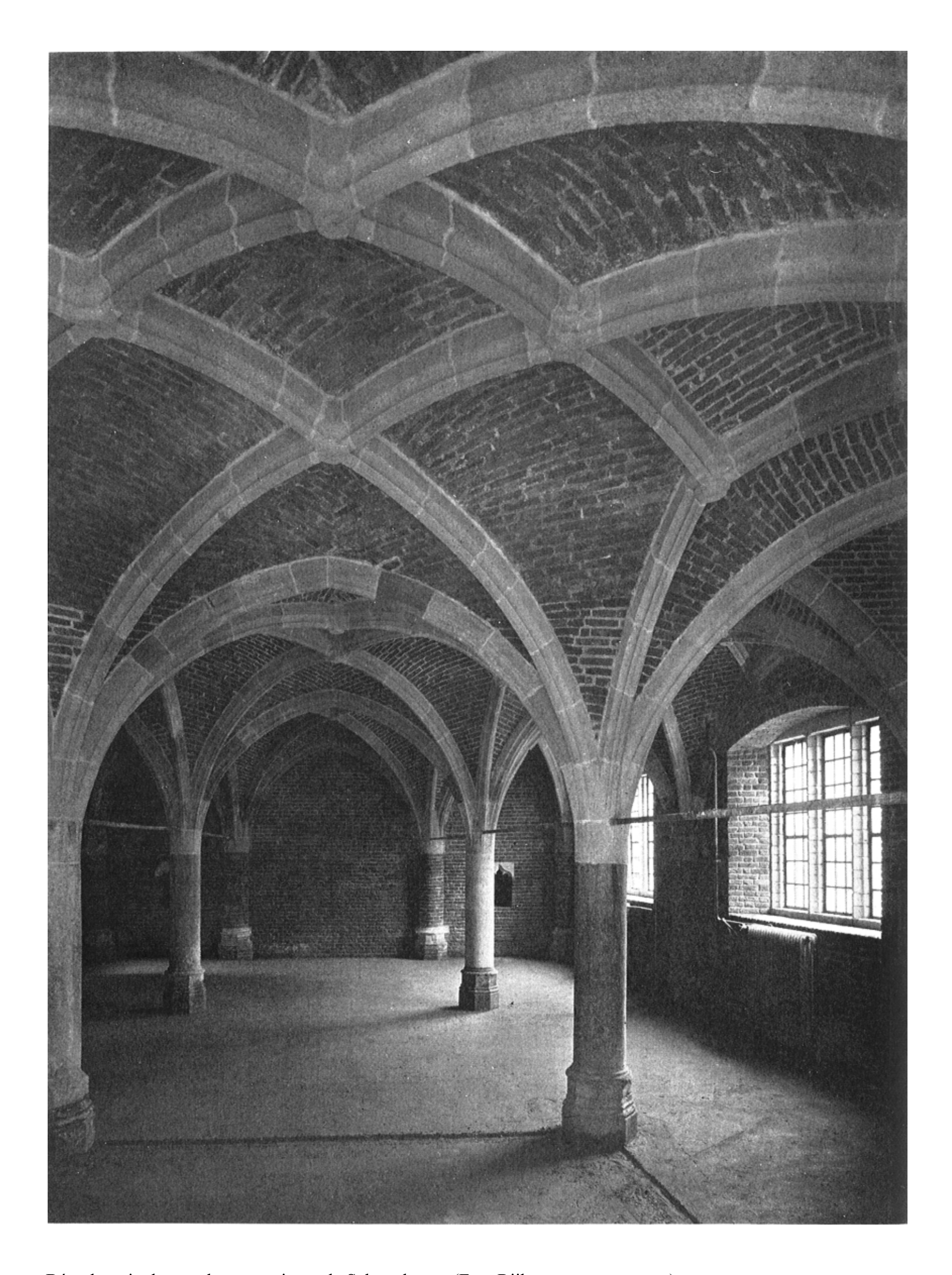


Arriba. Puente St Benezet en Avignon (siglo XII)
Derecha. Bóveda estrellada, Tondevere (Portugal)
Izquierda. Bóveda estrellada en la catedral de Lincoln
Abajo izquierda. Claustro en la catedral de Würzburg
Abajo derecha. Deambulatorio en la Iglesia Nueva de Delft



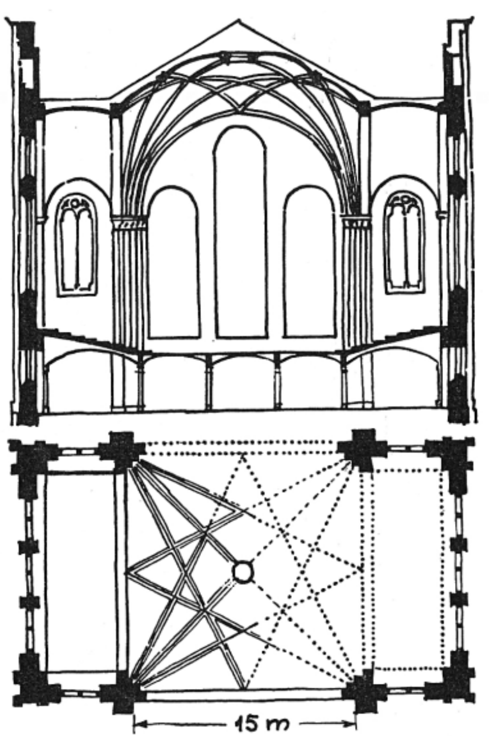


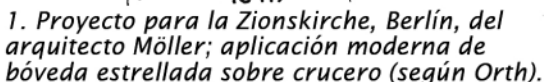




Bóveda reticular en el ayuntamiento de Schoonhoven (Foto Rijksmonumentenzorg)

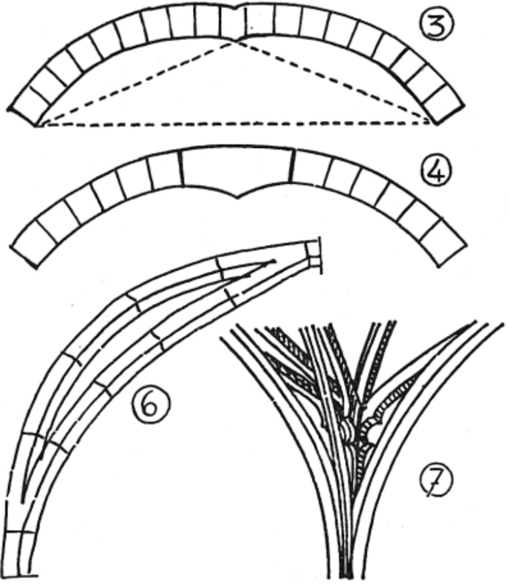
LÁMINA 66. BÓVEDAS NERVADAS DECORATIVAS



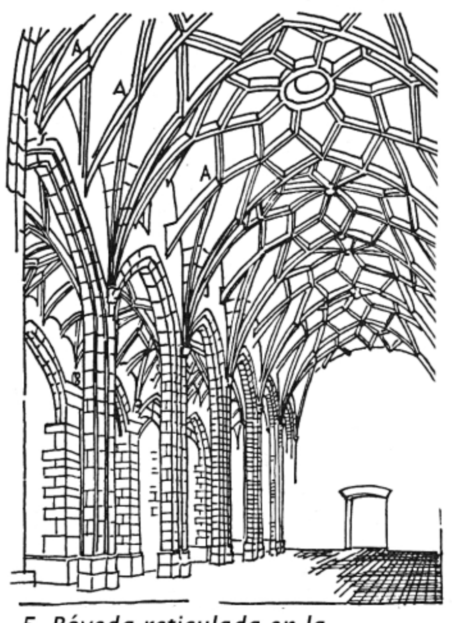


1. Proyecto para la Zionskirche, Berlín, del arquitecto Möller; aplicación moderna de bóveda estrellada sobre crucero (según Orth).

2. Bóveda estrellada sobre la sala capitular del claustro de Eberbach am Rhein. En medio de la sala hay una columna. Los nervios crecen desde las ménsulas; los paños de la bóveda tienen una inclinación pequeña y un espesor de medio pie (según Wanderley).



3. Sección de un nervio que muestra un quiebro en el centro; este nervio no es estable;
4. Se da una corrección, con el mismo intradós.
6 y 7. Nervios dobles (según Ungewitter).



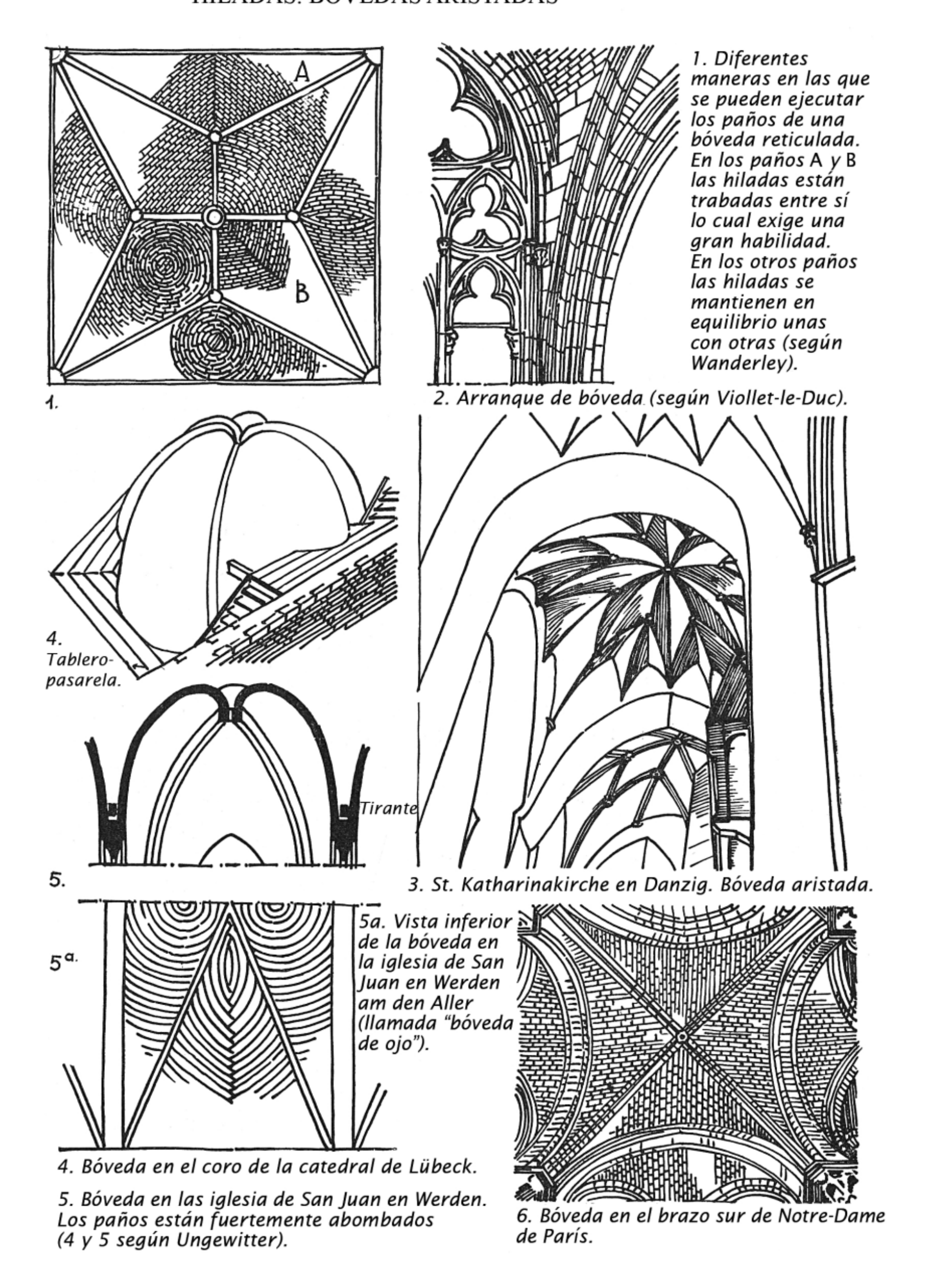
5. Bóveda reticulada en la Alexanderkirche de Marbach (según Dehio y von Bezold).
En A, se ven claramente variaciones de las secciones de los nervios, necesarias para unos cruzamientos razonables y la colocación de la plementería.

Se podría pensar que este método es el adecuado por excelencia para la determinación del discurrir de nervios en bóvedas sin arcos transversos o diagonales continuos. Sin embargo, se debe ser muy precavido con su empleo, ya que puede ocurrir que en los cruces de los nervios surjan quiebros y descensos que pongan en peligro la estabilidad de la construcción. Ungewitter califica este método como de dudosa utilidad. Fue difundido principalmente por Hoffstadt en su libro *Gothisches ABC Buch* (Frankfurt, 1840). El escritor se apoyaba para ello en un escrito del maestro de Danzig, Bartel Ranisch, de 1695. Pero este maestro vivió en un periodo en el que ya el buen trabajo manual de la Edad Media estaba en decadencia; la herencia gótica no había sido mantenida en su pureza.

Los principales puntos que deben atenderse al proyectar una bóveda estrellada o reticulada son los siguientes:

1. Hacer discurrir los nervios de la bóveda con toda la regularidad que sea posible.
2. Cuidar que no se produzcan quiebros con descenso en los nervios.
3. Tratar de adoptar en todo lo posible arcos de circunferencia para la forma de las partes de los arcos. Los arcos elípticos no son estáticamente tan favorables; además ofrecen dificultades en la construcción y en la determinación de los cortes de las piedras o ladrillos.
4. Los arcos largos conllevan más curvatura que los cortos; tienen que tener también más curvatura para poder trabajar estáticamente de forma satisfactoria.
5. En las bóvedas reticuladas de cañón los nervios se ponían preferentemente sobre una superficie cilíndrica con una sección estáticamente favorable.
6. En las bóvedas estrelladas y reticuladas sobre planta rectangular los nervios se situaban con preferencia sobre una superficie esférica. En la coronación se puede dar una curvatura algo mayor, con lo que se proporciona una corrección que sería necesaria si se produjera un descenso en la clave de la bóveda, una vez que la bóveda hubiera asentado definitivamente.
7. En una bóveda de abanico la altura de los arcos diagonales es mayor que la de los otros arcos que arrancan del capitel. La consecuencia es que la línea

LÁMINA 67. LOS PAÑOS DE LAS BÓVEDAS CON LA COLOCACIÓN DE LAS HILADAS. BÓVEDAS ARISTADAS



1. Diferentes maneras en las que se pueden ejecutar los paños de una bóveda reticulada. En los paños A y B las hiladas están trabadas entre sí lo cual exige una gran habilidad. En los otros paños las hiladas se mantienen en equilibrio unas con otras (según Wanderley).

2. Arranque de bóveda (según Viollet-le-Duc).

3. St. Katharinakirche en Danzig. Bóveda aristada.

5a. Vista inferior de la bóveda en la iglesia de San Juan en Werden am den Aller (llamada "bóveda de ojo").

4. Bóveda en el coro de la catedral de Lübeck.

5. Bóveda en las iglesia de San Juan en Werden. Los paños están fuertemente abombados (4 y 5 según Ungewitter).

6. Bóveda en el brazo sur de Notre-Dame de París.

de clave se vuelve ondulada. Si se hace el arco diagonal semicircular la ondulación es muy escasa pues la altura de los arcos difiere poco de unos a otros. Esta desigualdad se puede eliminar componiendo los arcos de dos partes trazados con radios diferentes. Los arcos más cortos tienen entonces en la coronación una inclinación algo mayor. La solución más bella se obtiene, sin embargo, haciendo todos los nervios de la misma longitud, y rellenando la parte superior con una figura en estrella o con otro motivo decorativo (Lám. 63, figs. 5–14).

Las plementerías

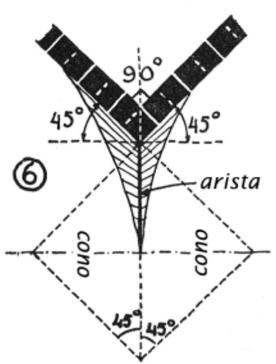
Cuando los nervios de una bóveda están terminados, se tiene aún gran libertad respecto a la colocación de los plementos. A menudo las hiladas de los paños discurren paralelas a las líneas de clave, pero también ocurre con frecuencia que son perpendiculares a los arcos diagonales; entonces la línea de clave se vuelve curva y las hiladas de los paños se colocan concéntricas.

En el gótico se puede resaltar la intención de ejecutar la plementería sin cimbra siempre que sea posible. Para ello, los ladrillos no deben sentarse con juntas demasiado inclinadas, pues podrían deslizar y caerse hacia abajo durante la ejecución. Cuanto más reducida es la luz, más pequeño es el peligro de deslizamiento, pues las piezas están entonces más trabadas y se apoyan mutuamente mejor que en una luz más grande.

Una superficie esférica resulta ideal para el constructor de bóvedas, puesto que en ella las piezas se sitúan de forma muy fija. Los paños de las bóvedas estrelladas y reticuladas eran además también frecuentemente abombados.

Se pueden aún añadir todo tipo de variaciones en la dirección de las hiladas. A veces el paño de una bóveda se rellena con hiladas que discurren paralelas las unas con las otras en dirección recta u oblicua, el paño contiguo se ejecuta con hiladas concéntricas y luego, se emplea un aparejo en espina de pez; por ello no se puede indicar ninguna costumbre fija (Lám. 67, fig. 1). Alguna vez se ha constatado que el albañil, para evitar el difícil aparejo de hiladas trabadas en los paños, colocó éstas en círculos concéntricos, ya que el aparejo trabado se debe ejecutar con extraordinario cuidado y esto solo se da en casos de albañiles o canteros muy expertos. Tiene tanta capacidad de atracción un aparejo ingenioso eje-

LÁMINA 68. LA CONSTRUCCIÓN DE UNA BÓVEDA ARISTADA



Bóveda aristada tardogótica de ladrillo en el Colegium Tagellonicum de Cracovia (según levantamiento del profesor G. Bisanz). Las hiladas de los paños acometen perpendicularmente a las aristas formando encuentros fáciles de ejecutar en ladrillo. Las aristas largas AF, BE *tienen el mismo perfil, compuesto de tres arcos de circunferencia; arco* A° G° F° *en fig. 2 . El constructor podía elegir libremente la forma de este arco carpanel, en función de la forma deseada para la bóveda. Determinaba los nervios cortos* AE, DE, *etc. haciéndolos iguales al primer segmento* A°b° *de la arista grande, en la que* b° *está a la misma altura que* E' *y* F'. *Las superficies de los paños son partes de conos pertenecientes a superficies cónicas con ángulos en la base de 45° (figs. 4, 6), cuya base está formada por las líneas de corte de los paños (segmentos de circunferencia), o sea por los bordes de las aristas salientes.*

En las líneas de encuentro de los paños E'M'A', A'M'G' *etc. (fig. 5) en donde surgen las aristas remetidas, los ladrillos tienen que cortarse pasando de unos hacia los otros o trabarse entre sí.*

cutado con gran esmero como el trabajo burdo, en el que lo único bueno es una capa de yeso que lo oculta a la vista.

La experiencia enseñó a los constructores de iglesias a atender a más cosas que exclusivamente un buen dibujo y una perfecta ejecución de las bóvedas. Es un hecho que las iglesias abovedadas medievales tienen una buena acústica. Esto sucede porque las bóvedas constan de superficies curvadas en diferentes direcciones y están ejecutadas con juntas gruesas de un mortero poroso. Los plementos se hacían con un material lo más ligero posible, a menudo de ladrillo considerablemente blando, formado a mano. La superficie era por consiguiente un tanto áspera, lo que junto con la blandura de los ladrillos eran en sí mismos medios eficaces contra la resonancia. (El ruido era por consiguiente absorbido y dispersado.)

Sobre el trasdós de las bóvedas se colocaba un recubrimiento de mortero pobre. Puesto que en caso de fuego existe el peligro de que, por sobreabundancia de agua de extinción, las bóvedas sufran daños, en los últimos años se ha llevado a cabo en nuestras iglesias antiguas un cuidadoso revestimiento superior de las bóvedas acabado finalmente con asfalto.

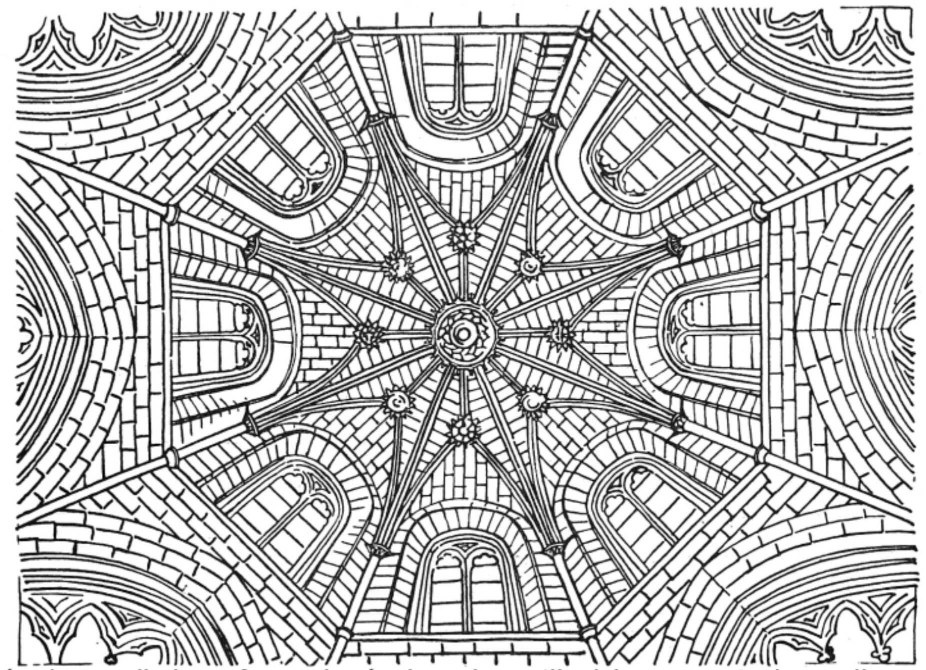
Los espacios huecos tales como los senos entre bóvedas y muros se rellenaron con mampostería de cascote y argamasa.

Actualmente estos espacios se rellenan frecuentemente con hormigón apisonado; en la restauración de bóvedas antiguas se ha de ser muy cuidadoso con eso ya que puede ocurrir que en la parte inferior, debido a la humedad del mortero, surjan manchas en la fábrica vista que no se pueden eliminar. Es mejor por tanto seguir la antigua manera y rellenar con fábrica.

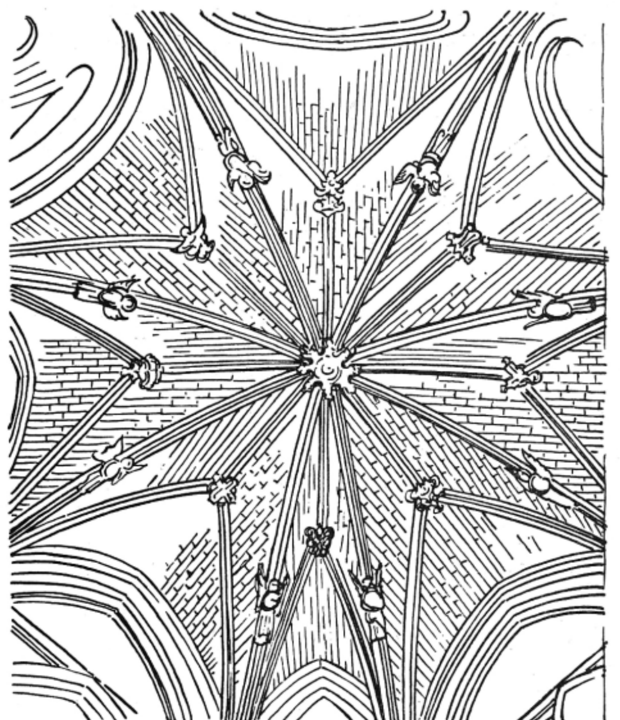
La mayoría de las veces el espacio sobre las bóvedas se hace transitable mediante la colocación de pasarelas de tableros y escaleras, con lo que las bóvedas se pueden inspeccionar de una manera fácil (Lám. 67, fig. 4).

A veces se hacían agujeros en el casco de las bóvedas para pasar cuerdas y poder colgar lámparas u otros objetos. Estos agujeros, que se colocaban la mayoría de las veces en las claves, servían también para la ventilación de los espacios abovedados.

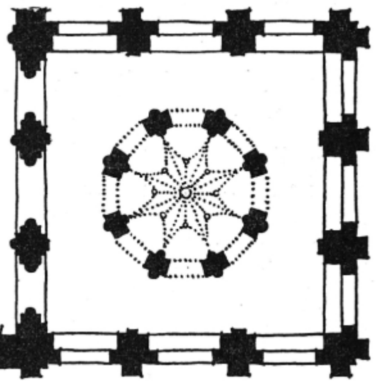
LÁMINA 69. BÓVEDAS ESTRELLADAS



1. Bóveda estrellada en forma de cúpula en la capilla del monasterio de Batalha (Portugal). Las piedras de los plementos de la estrella se han colocado perpendiculares a los nervios. Una enorme clave recibe los nervios.



2. Bóveda estrellada en forma de cúpula en la capilla de Santiago en la catedral de Toledo. Las piedras de la plementería discurren paralelas a las líneas de clave.

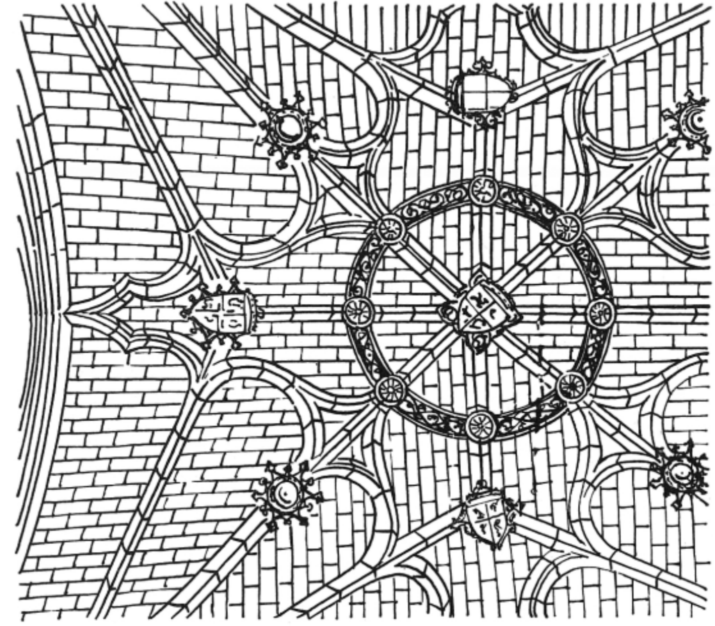


4. Planta del Mausoleo, Batalha.

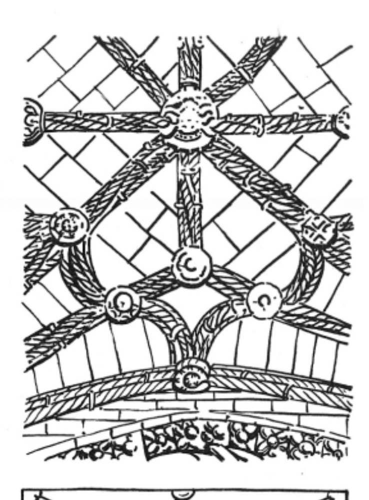


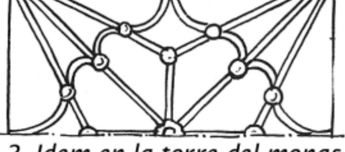
3. Bóveda en el refectorio del monasterio de Belem (Portugal).

LÁMINA 70. BÓVEDAS NERVADAS DECORATIVAS

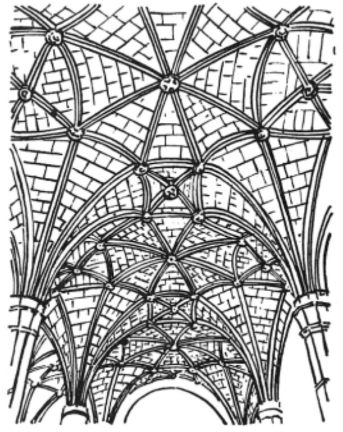


1. Bóveda estrellada de gran riqueza en la capilla de los Reyes Nuevos en la catedral de Toledo. Por razones decorativas los nervios se han curvado en diferentes direcciones; esto no ha influido en el aparejo de la plementería.

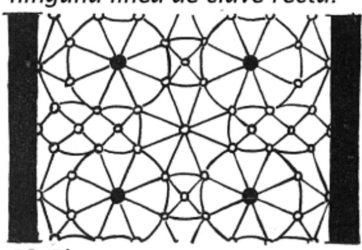




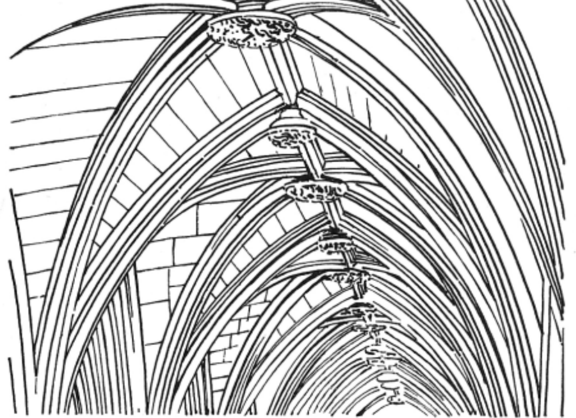
2. Idem en la torre del monasterio de Belem. Las piedras de la plementería de la bóveda son perpendiculares a los nervios.



3. Capilla del monasterio de Belem (Portugal) cubierta con bóvedas estrelladas en las que no aparece ninguna línea de clave recta.



3ª. Planta.



4. Claustro del monasterio de Batalha (Portugal). Esta galería se ha cubierto con bóvedas sexpartitas con las que evidentemente se pretende la formación de una línea de clave recta. Los puntos nodales de los considerablemente pesados nervios han sido decorados con claves ricamente labradas. Esta bóveda, sencilla, en cuanto a construcción, atrae plenamente la atención. La línea de clave recta une los nervios y refuerza el efecto perspectivo en la dirección longitudinal.

La estabilidad de las bóvedas

Los plementos se colocaban sobre los nervios o tendidos entre ellos. Con frecuencia, se les daba una curvatura en todas direcciones de forma que era más fácil ejecutarlas al aire, sin cimbras de apoyo.

La plementería da a las bóvedas una considerable rigidez; por ejemplo, el sistema inestable de nervios de las bóvedas reticuladas se vuelve indeformable.

Para tener una buena comprensión de la estabilidad de los nervios proyectados se debe verificar que cada nudo o clave, está bien apoyado. Cada clave debe como mínimo estar soportada por tres nervios, los cuales deben resultar sólidos, es decir deben estar a altura suficiente sobre el plano que pasa por sus puntos de arranque. El apoyo de dos nervios no es suficiente, pues un pequeño empuje lateral puede deshacer el equilibrio (Lám. 61, fig. 8D).

Puede ocurrir también que sobre las claves apoyen nervios que se eleven hacia arriba; no hay ningún inconveniente, si el equilibrio de fuerzas queda asegurado. Se tiene por tanto que comprobar si los nervios de apoyo inferiores pueden ejercer suficiente contrarresto.

Los descensos en los nervios pueden ser peligrosos si no hay al menos tres nervios no descendentes en el punto de cruce. Los nervios dirigidos hacia abajo aparecen bastante a menudo sobre todo en el gótico tardío. Pero esto sólo fue aparente y no real, pues los constructores hacían la sección de los nervios en la zona de la clave más alta, de forma que pudieran apoyarse unos con otros de la manera normal (Lám. 66, fig. 4).

Se encuentran ejemplos más claros principalmente cuando la bóveda está provista de nervios dobles, donde los superiores soportaban los paños y los inferiores se quedaban volados, debajo de las bóvedas. A veces a estos nervios volantes se les daba una dirección distinta, con lo que se obtenía un interesante juego de líneas (Lám. 66, figs. 6, 7; Lám . 57, fig. 9).

El contrarresto de las construcciones abovedadas

La oposición al empuje lateral de las bóvedas se obtenía con la colocación de estribos. El empuje de las bóvedas fue absorbido de forma satisfactoria

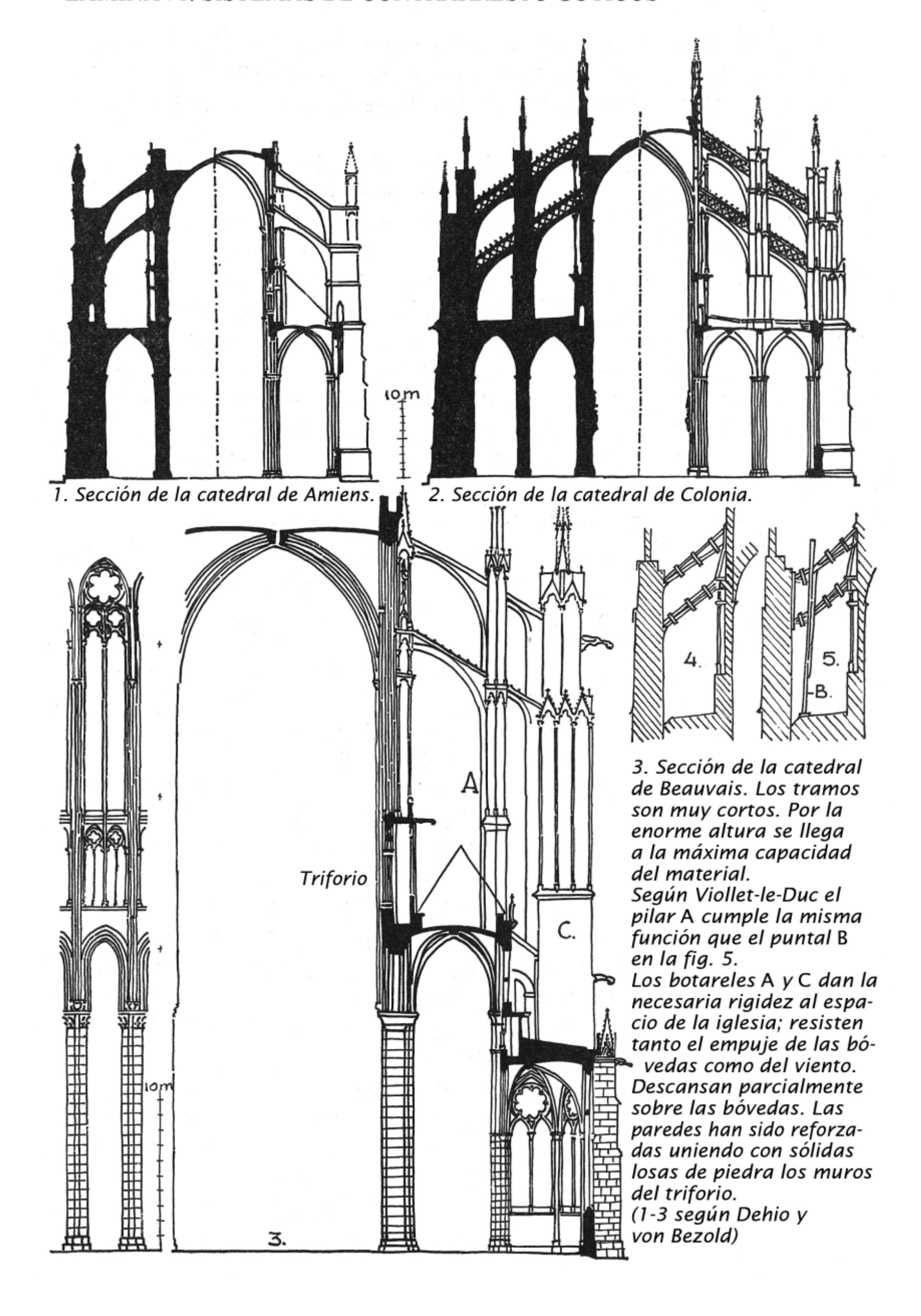
la mayoría de las veces, al menos en la dirección transversal de la iglesia; pero debe también tenerse en cuenta el empuje ejercido en la dirección longitudinal. Dado el reducido ancho de los tramos de bóvedas en sentido longitudinal, este empuje no era grande. Pero las bóvedas son como soldados puestos ordenadamente en sus filas, uno tras otro, y un empuje ejercido longitudinalmente se transmite de una bóveda a otra hasta los extremos. Asientos diferenciales podrían llegar a incrementar considerablemente este empuje. En la cabecera, es decir en la parte oriental de la iglesia, la zona del ábside cumple la función de elemento de contrarresto y, en el lado oeste, la mayoría de las veces un par de robustas torres venían a dar firmeza a la serie de pilares de la nave. También se colocaban contrafuertes masivos contra la fachada.

Si las iglesias medievales alcanzaban una altura considerable, podía no bastar con la colocación de contrafuertes, ya que no había que contar sólo con el empuje de las bóvedas, más peligroso a medida que los arranques de las bóvedas eran más altos, sino también con la presión del viento, que podía llegar a ser muy grande (véase también el Cap. 5 más adelante).

El peso, relativamente pequeño, de la construcción de la iglesia ofrecía insuficiente resistencia contra el viento. La presión contra los muros exteriores ejercía su fuerza también en los paramentos opuestos, a los que había que añadir la influencia de la succión del viento. Como estos muros estaban perforados por ventanales había gran peligro de que pudieran quebrarse y caer hacia el interior. Se intentaba, por tanto, que los muros fueran rígidos; a tal efecto se tuvo que aumentar el espesor, y esto se logró haciéndolos dobles y reforzando el conjunto de muros dobles con uniones en determinadas zonas. En muchas iglesias el triforio sirvió para este fin; a veces se colocaban varios de estos pasillos de servicio unos encima de otros. Las paredes del triforio se unían de trecho en trecho con los muros situados detrás mediante losas rígidas de piedra (Láms. 71–73).

Además, se situaban a cierta distancia de la iglesia pesados estribos de piedra a modo de masivas torres, desde las que se tendían los sistemas de arbotantes, simples, dobles y hasta triples, hacia las partes reforzadas de los muros.

LÁMINA 71. SISTEMAS DE CONTRARRESTO GÓTICOS



1. Sección de la catedral de Amiens.

2. Sección de la catedral de Colonia.

3. Sección de la catedral de Beauvais. Los tramos son muy cortos. Por la enorme altura se llega a la máxima capacidad del material.
Según Viollet-le-Duc el pilar A cumple la misma función que el puntal B en la fig. 5.
Los botareles A y C dan la necesaria rigidez al espacio de la iglesia; resisten tanto el empuje de las bóvedas como del viento.
Descansan parcialmente sobre las bóvedas. Las paredes han sido reforzadas uniendo con sólidas losas de piedra los muros del triforio.
(1-3 según Dehio y von Bezold)

Un punto difícil en la colocación de los arbotantes surge en el crucero, ya que las estructuras que soportan la nave principal de la iglesia se verían atravesadas por los arcos que contrarrestaban la nave transversal. A veces se solventaba esta dificultad eliminando los arbotantes, pero también se dejaban simplemente discurrir atravesándose mutuamente. Un ejemplo de la primera manera, es decir, de la eliminación de los arbotantes en la nave transversal, lo vemos en Notre-Dame de París, donde el crucero tiene una considerable rigidez debido a las fachadas laterales contra las que, además, se apoyan las pequeñas torres de las escaleras.

Sainte-Ouen de Rouen tiene por el contrario arbotantes tanto en la nave principal como en la transversal, que se cortan donde la nave principal es de cinco vanos, de manera que se origina un interesante entrecruzamiento de arbotantes (Lam. 73, fig. 1).

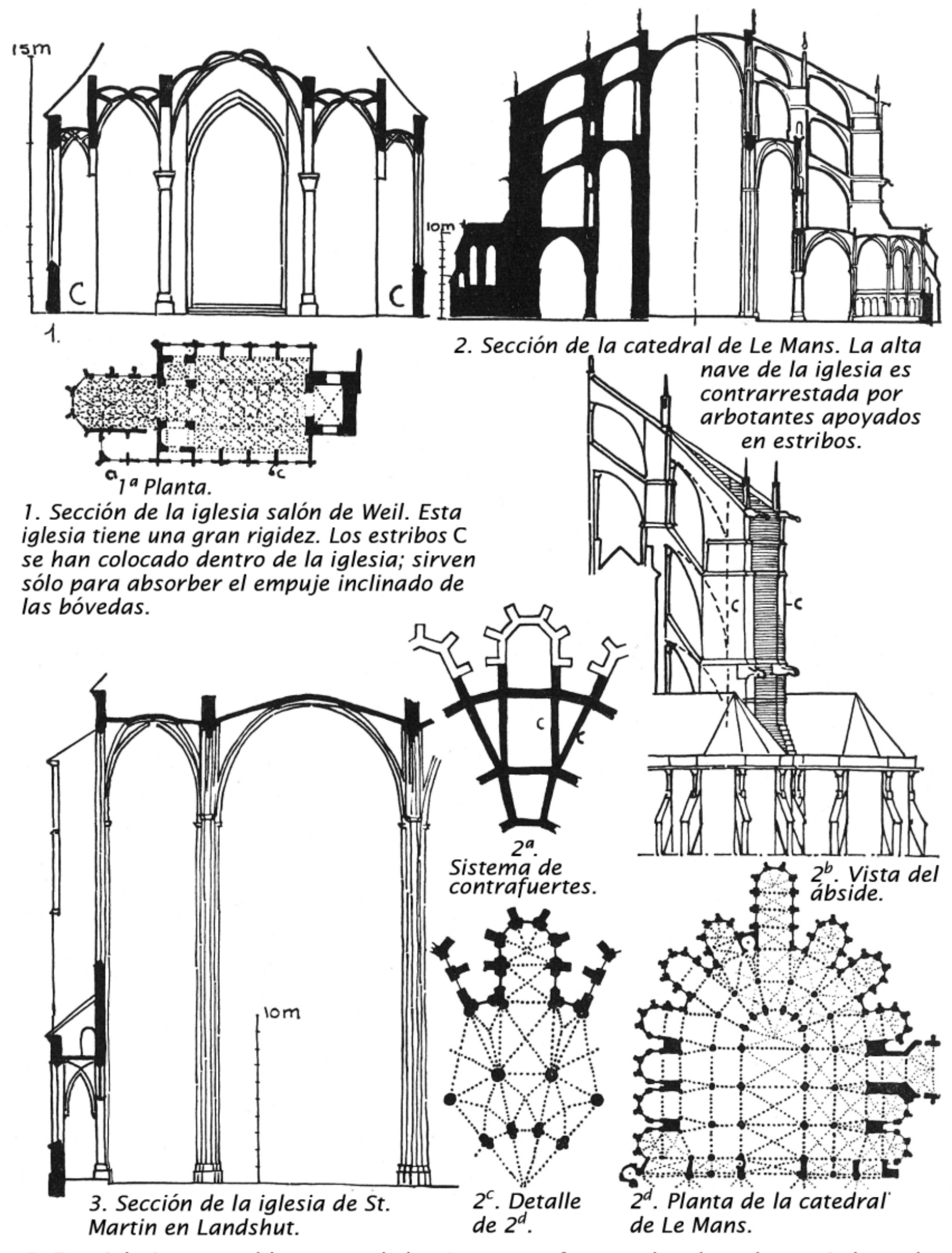
Las intrépidas estructuras a las que se atrevieron los maestros medievales en la construcción de catedrales esbeltas como torres han despertado la admiración de los estudiosos del gótico.

Mucho se ha escrito sobre ello y en el transcurso de los años han surgido bastantes diferencias de opinión en relación a la eficacia de las construcciones góticas. Un ejemplo de subestimación lo da por ejemplo el profesor Guadet cuando juzga la forma de los arbotantes de Sainte-Ouen de Rouen; profundizaremos sobre ello en el apartado dedicado a los constructores medievales de bóvedas, más adelante (Lám. 75, fig. 1).

En muchos libros sobre la técnica medieval de bóvedas se vuelven a encontrar las consideraciones que Viollet-le-Duc, sobre sus muchas obras estudiadas, anotó con convincente pluma. Pero sus teorías se deben aceptar con la necesaria crítica, lo que no significa desdecir el valor del genial escritor, indudablemente uno de los mejores conocedores de la arquitectura medieval.

Según Viollet-le-Duc los arbotantes no sólo daban contrarresto a las bóvedas, sino que incluso soportaban una parte de su peso, descargando a los pilares principales de la nave de la iglesia, que se podían hacer más delgados. Esta opinión no se corresponde con la realidad. Naturalmente, los arbotantes equilibran el empuje de las bóvedas, impidiendo que tenga efectos perjudiciales, pero no tienen ninguna influencia sobre el grosor de los pilares, que transmiten las fuerzas en dirección casi vertical hacia la cimentación.

LÁMINA 72. SISTEMAS DE CONTRARRESTO GÓTICOS



1ª Planta.

1. Sección de la iglesia salón de Weil. Esta iglesia tiene una gran rigidez. Los estribos C *se han colocado dentro de la iglesia; sirven sólo para absorber el empuje inclinado de las bóvedas.*

2. Sección de la catedral de Le Mans. La alta nave de la iglesia es contrarrestada por arbotantes apoyados en estribos.

2ª. Sistema de contrafuertes.

2ᵇ. Vista del ábside.

3. Sección de la iglesia de St. Martin en Landshut.

2ᶜ. Detalle de 2ᵈ.

2ᵈ. Planta de la catedral de Le Mans.

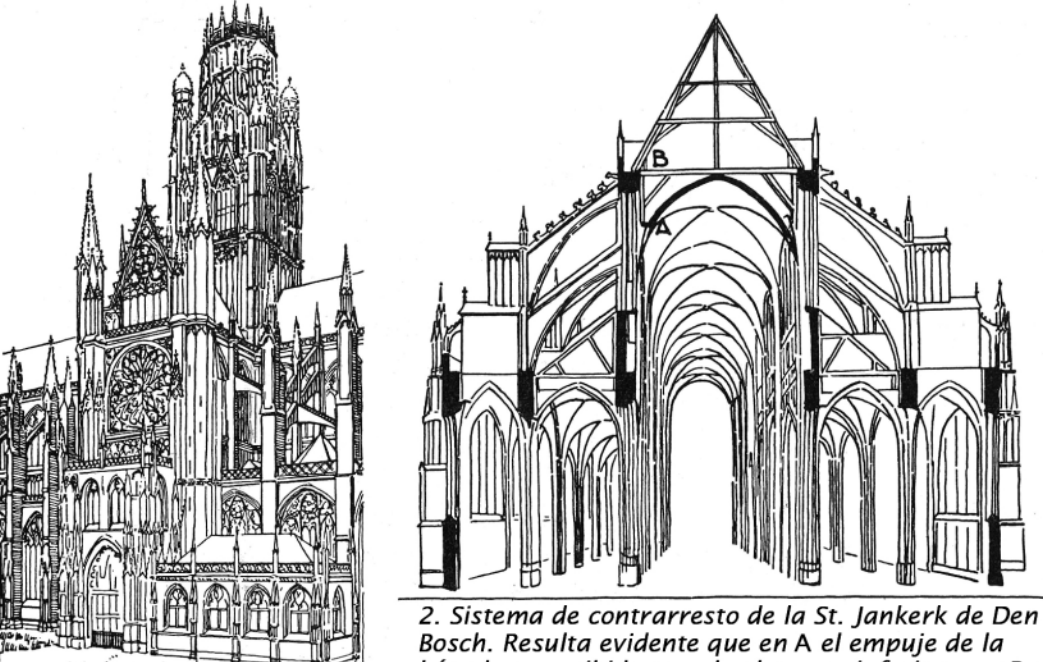
3. Esta iglesia es notablemente esbelta. Los contrafuertes absorben el empuje lateral de las bóvedas; como las fuerzas del viento se reparten entre los tres vanos abovedados, no son necesarios arbotantes.
(1, 2 y 3: según Dehio y von Bezold)

Viollet-le-Duc concede además gran valor a los pináculos que en muchos casos se colocaban rematando los estribos exteriores contra los que apoyaban los arbotantes. Así, dice: «Puesto que los medievales no consideraban que los estribos exteriores ofrecieran suficiente resistencia contra la acción combinada de la presión de la bóveda y el arbotante, recrecieron los pilares con un pináculo que reforzaba su estabilidad. Dichos pináculos permitían reducir la sección de los estribos».

Si se toma en consideración que, en la mayoría de los casos su peso se puede despreciar en comparación con el gran peso de los enormes estribos (una excepción la forman, por ejemplo, los pináculos de la catedral de Milán), que además con frecuencia se colocaban en la parte exterior del estribo, con lo que desplazaban el centro de gravedad y por consiguiente eran más bien perjudiciales, entonces resulta que la influencia favorable de los pináculos se exagera considerablemente. La construcción más osada es probablemente la cabecera de la catedral de Beauvais (Lam. 71, fig. 3). En este caso, los estribos están dispuestos muy separados de la nave y constan de dos partes unidas por medio de pequeños arbotantes. Esta es una disposición lógica que aumenta la estabilidad. Los pilares intermedios están bien cargados y descansan sobre los arcos perpiaños de las bóvedas inferiores. Este tipo de carga sobre arcos transversales fue realizada más veces en la Edad Media, entre otros casos se puede encontrar también en St. Jan de Den Bosch (Lám. 73, fig. 2), pero desde el punto de vista constructivo no es lo más correcto hacer descansar parte del gran peso de los estribos sobre las bóvedas inferiores. Según Viollet-le-Duc, los maestros medievales lo hicieron de forma intencionada, para obtener al pie de los pilares un cierto efecto de articulación. La utilidad de este efecto de articulación fue ilustrada por él en algunas figuras en las que los arcos de piedra y el pilar menor se sustituyeron por construcciones de madera (Lám. 71, figs. 4, 5).

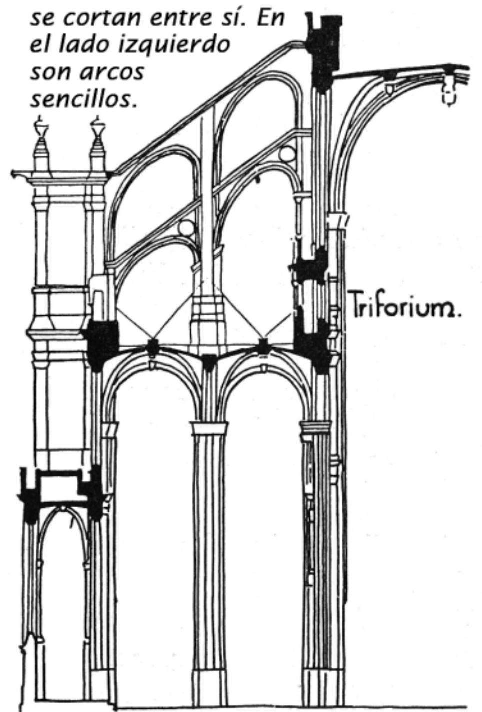
Resulta evidente que, en este caso, el perspicaz arquitecto confunde aquí dos métodos constructivos: la construcción en piedra en la que el peso de la fábrica resiste contra el vuelco y no se puede admitir ningún valor apreciable a las tracciones, y un método constructivo que hace uso de elementos rígidos que se unen unos con otros articuladamente, tal como ocurre en las modernas construcciones de hierro.

LÁMINA 73. SISTEMAS DE CONTRARRESTO GÓTICO

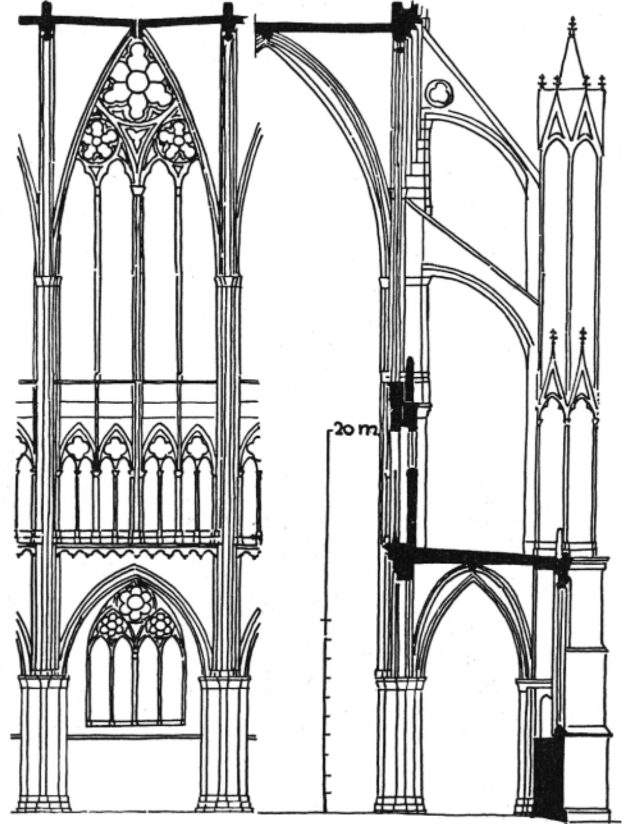


1. St Ouen de Rouen. Los arbotantes a la derecha del crucero se cortan entre sí. En el lado izquierdo son arcos sencillos.

2. Sistema de contrarresto de la St. Jankerk de Den Bosch. Resulta evidente que en A el empuje de la bóveda es recibido por el arbotante inferior y en B el empuje del viento por el arbotante superior.



3. Construcción tardogótica de contrarresto de St. Eustache de París. La ancha losa de cubierta sobre los arbotantes proporciona la suficiente rigidez (1, 3, 4 según Dehio y von Bezold; 2 según dibujo de Joh. Evers).



4. Sistema de contrarresto de la catedral de Metz.

Asegurar la estabilidad de iglesias cubiertas con bóvedas a gran altura costó una increíble cantidad de material y trabajo; además conllevó un inconveniente estético porque los arbotantes de la nave principal tienen una distancia entre sí distinta que los de la cabecera, produciendo una impresión de intranquilidad. Desde fuera, se ve la iglesia apuntalada por pesados estribos e hileras de arbotantes; ofreciendo un enorme contraste, el interior parece desmaterializado; las pesadas bóvedas parecen estar sustentadas por esbeltas columnas y finas columnillas. Siempre hay material suficiente, pero está disimulado, oculto por columnillas y pilarcillos, escondido tras columnas perfiladas y profusas molduras.

En el gótico no se dejó exclusivamente la función del contrarresto a determinados elementos de contención; se intentó también situar las diferentes partes de la obra de forma que pudieran apoyarse las unas en las otras y ejercer oposición al empuje.

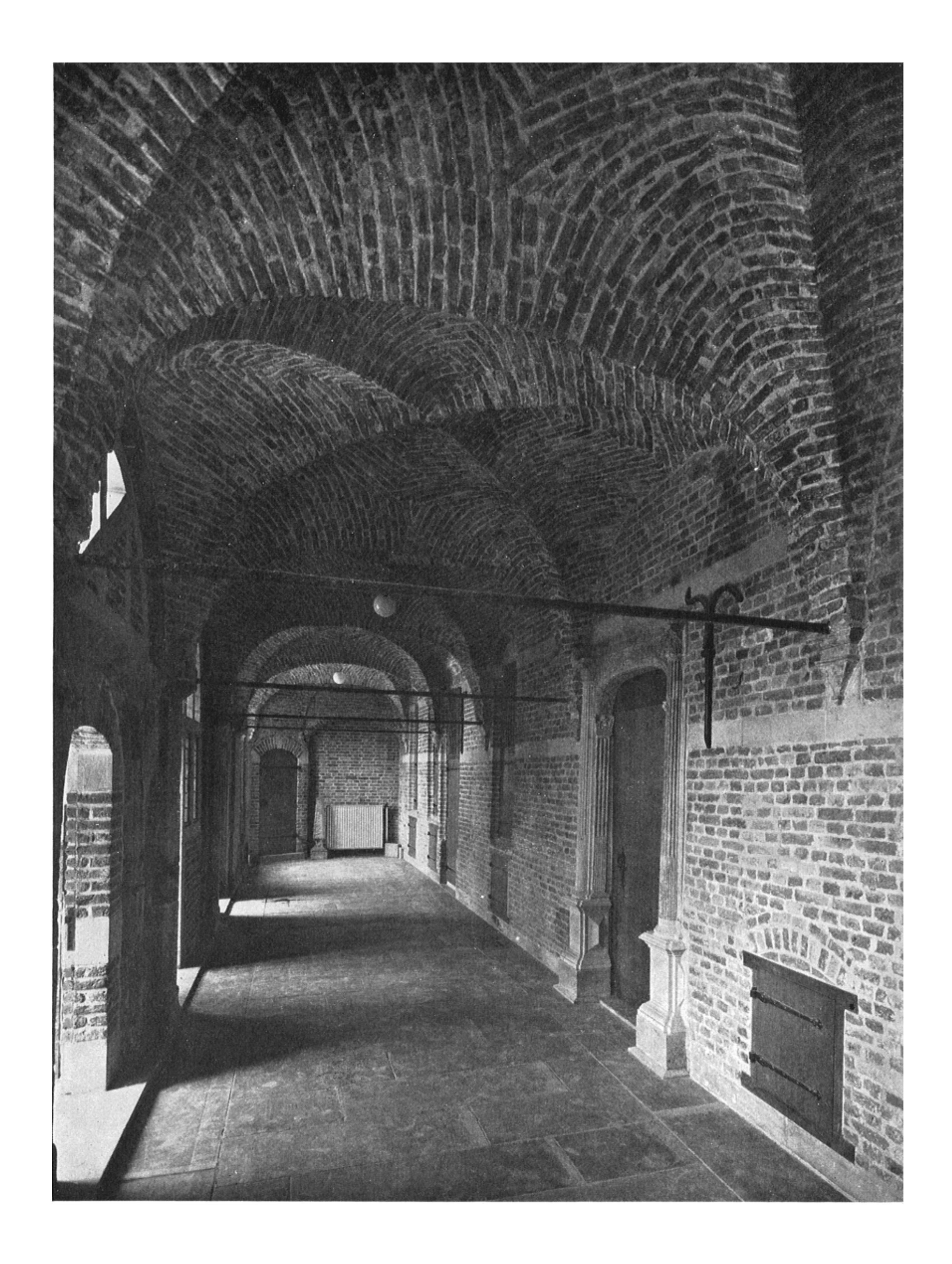
Un bello ejemplo de ello lo da la cabecera de la catedral de Le Mans (Lám. 72, figs. 2–2^b). Un anillo de capillas rodea el coro; estas capillas sustentan los pilares sobre los que tienen su apoyo las bóvedas. Pero estas capillas no son tan altas como sería necesario para un suficiente contrarresto. Por ello se colocaron estribos sobre los muros laterales que, sobresaliendo por encima de las cubiertas, reciben los arbotantes. Por el mismo motivo, se dirigieron los estribos de dos en dos en forma de V hacia el interior de la iglesia.

En el gótico inglés, alemán y holandés se buscaron soluciones más sencillas; se trataron de eliminar en la medida de lo posible los pesados arbotantes con los correspondientes elementos de contrarresto; se hicieron las iglesias más bajas, y las bóvedas se tendieron más rebajadas de forma que daban más rigidez a la nave de la iglesia.

La menor altura del espacio de la iglesia iba, sin embargo, en contra del sentimiento formal de gótico que, sobre todo en el alto gótico, aspiraba a crear sensaciones espaciales que sustrajeran a los hombres de los pensamientos mundanos. Para el interior de la iglesia se exigía una gran altura; esta tendencia hacia iglesias cada vez más altas se aprecia con claridad en el desarrollo del gótico, que cada vez más quería despertar la idea de gran profundidad y elevación. Se fue tan lejos que se llegó incluso exigir lo imposible a los materiales, y se produjeron algunos hundimientos.

Arriba. Bóveda de estrella con nervios en el ayuntamiento de Hulst

Abajo. Bóveda de estrella con aristas en la casa situada en la Nobelstraat, esquina con Oude Molstraat de La Haya (Fotos Rijksmonumentenzorg).



Bóvedas de arista en el ayuntamiento de Venlo (Foto Rijksmonumentenzorg)

En las iglesias inglesas se empleó preferentemente la bóveda nervada múltiple, obteniéndose un juego de líneas que reforzó el efecto de perspectiva, aumentando la sensación de altura (Lám. 63, fig. 6).

Pero también se llegó en el gótico a otro tipo de iglesia, la denominada iglesia salón, en la que todas las naves se hacían de la misma altura y los tramos de la misma longitud. Este tipo ofrece más resistencia contra el viento que el basilical porque son las columnas de dos o tres vanos, situados uno tras otro, las que ofrecen resistencia contra desplazamientos y deformaciones. Los contrafuertes son en las iglesias de salón, por lo general, lo suficientemente pesados y fuertes como para poder absorber ellos solos el empuje lateral de las bóvedas (Lám. 72, figs. 1, 3).

Las iglesias salón se extendieron sobre todo entre las órdenes mendicantes que se ocuparon del trabajo parroquial y que, naturalmente, tenían que construir sus iglesias de forma económica.

Empleo de tirantes

En la Edad Media los constructores de bóvedas hicieron un amplio uso de los tirantes. Los hacían, bien permanentes, o los usaban solamente durante la ejecución de las bóvedas (Lám. 74).

A menudo se hacían de madera introduciéndose en el espesor de la fábrica. Por la humedad del ambiente (la fábrica contiene mucha agua) y el cierre al aire exterior, estas vigas no tenían una larga duración.

Pero el empleo de tirantes de hierro conllevó también sus inconvenientes; la oxidación del hierro, con el consiguiente aumento de volumen, produjo frecuentes fracturas en la fábrica. En el siglo XV el uso de tirantes interiores se redujo, y se emplearon tirantes vistos, de manera que se pudieran controlar y, eventualmente, reparar. La mayoría de las veces se dotó a la iglesia de un completo sistema de tirantes, tanto en la dirección longitudinal como en la trasversal. En las ventanas se colocaron fuertes barras pasantes de hierro.

Se era consciente de que el uso de tirantes podía ser peligroso; por ejemplo un ligero asiento en las bóvedas no era en sí mismo grave, pero debido al tirante podía ocurrir que las tensiones locales aumentaran considerablemente, lo que podía ocasionar roturas. Las bóvedas medievales se ejecutaron con un mortero de

endurecimiento lento; una pequeña deformación de las bóvedas no tenía por qué tener consecuencias perjudiciales, pero cuando esta deformación era impedida localmente por un tirante, la situación podía llegar a ser muy diferente; la deformación gradual se perturbaba de forma que no se podía lograr un adecuado equilibrio.

Se intentó en la medida de lo posible evitar grandes tensiones locales. Para ello, durante la construcción, se unían las columnas enfrentadas mediante tirantes de madera, para impedir cualquier desplazamiento. Cuando el edificio estaba terminado, se cortaban dichos tirantes. Ojales de hierro dentro de la fábrica señalan aún a veces el lugar donde dichos tirantes discurrían por la iglesia.

En Italia, la presencia de atirantados vistos no se consideró un inconveniente, a diferencia del oeste de Europa. En muchas iglesias se encuentran aún los tirantes presentes sin que sea motivo de escándalo.

Los constructores medievales de bóvedas

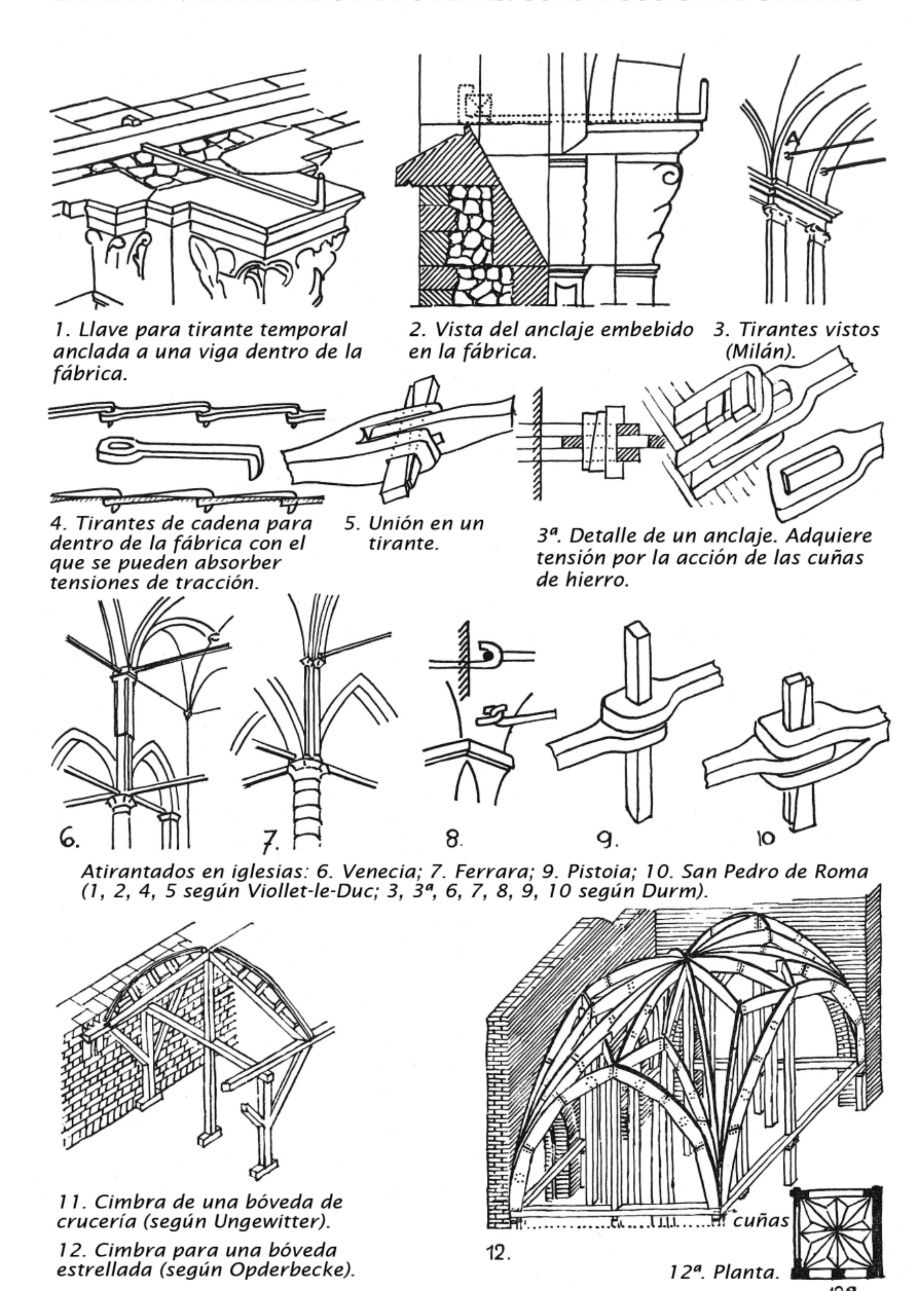
El estudio de la construcción abovedada ha sido llevado a cabo con gran pasión por numerosos arquitectos y arqueólogos, que han llegado a muy diferentes conclusiones acerca de los conocimientos que poseían los constructores medievales.

El arquitecto Hasak pensaba que, además de una gran experiencia en el campo constructivo, también tenían determinados métodos de cálculo, de manera que podían determinar de antemano la resistencia y estabilidad de las bóvedas con bastante seguridad. Como prueba de su opinión cita dos fuentes documentales medievales.

La primera concierne a la construcción de la catedral de Milán. En 1398 la comisión para su construcción, que estaba realmente intranquila en relación a los planes de sus maestros constructores, pidió el juicio de algunos arquitectos alemanes y también de un francés. Este último, el maestro Mignot, dijo en un informe que, según su opinión, los estribos proyectados eran demasiado exiguos y además expresó su rechazo sobre la estructura.

Los colegas italianos se defendieron con talento. Señalaron que las piedras que querían emplear tenían mayor dureza que las calizas francesas; que habían dado a los arcos una forma apuntada a fin de neutralizar el empuje lateral y que se colocaría un meditado sistema de tirantes.

LÁMINA 74. ATIRANTADO DE BÓVEDAS. CONSTRUCCIÓN DE CIMBRAS



1. Llave para tirante temporal anclada a una viga dentro de la fábrica.

2. Vista del anclaje embebido en la fábrica.

3. Tirantes vistos (Milán).

4. Tirantes de cadena para dentro de la fábrica con el que se pueden absorber tensiones de tracción.

5. Unión en un tirante.

3ª. Detalle de un anclaje. Adquiere tensión por la acción de las cuñas de hierro.

Atirantados en iglesias: 6. Venecia; 7. Ferrara; 9. Pistoia; 10. San Pedro de Roma (1, 2, 4, 5 según Viollet-le-Duc; 3, 3ª, 6, 7, 8, 9, 10 según Durm).

11. Cimbra de una bóveda de crucería (según Ungewitter).

12. Cimbra para una bóveda estrellada (según Opderbecke).

12ª. Planta.

El segundo informe que cita Hasak se refiere a la construcción de la catedral de Gerona, en España, para la que el obispo en 1417 pidió consejo a arquitectos foráneos porque no confiaba completamente en los planes de Guillermo Bofill, su arquitecto.

Se dirigió a algunos maestros constructores de ciudades al norte y al sur de los Pirineos. Uno de los maestros de Manresa aconsejó usar piedra dura de Gerona para los nervios, contrafuertes, pilares y también para las partes bajas del muro y para los plementos piedras más ligeras. Además, en conjunto, emitieron el juicio de que los estribos eran suficientemente fuertes para las bóvedas que tenían que soportar. Bofill opinaba incluso que los pilares podían ser un tercio más delgados.

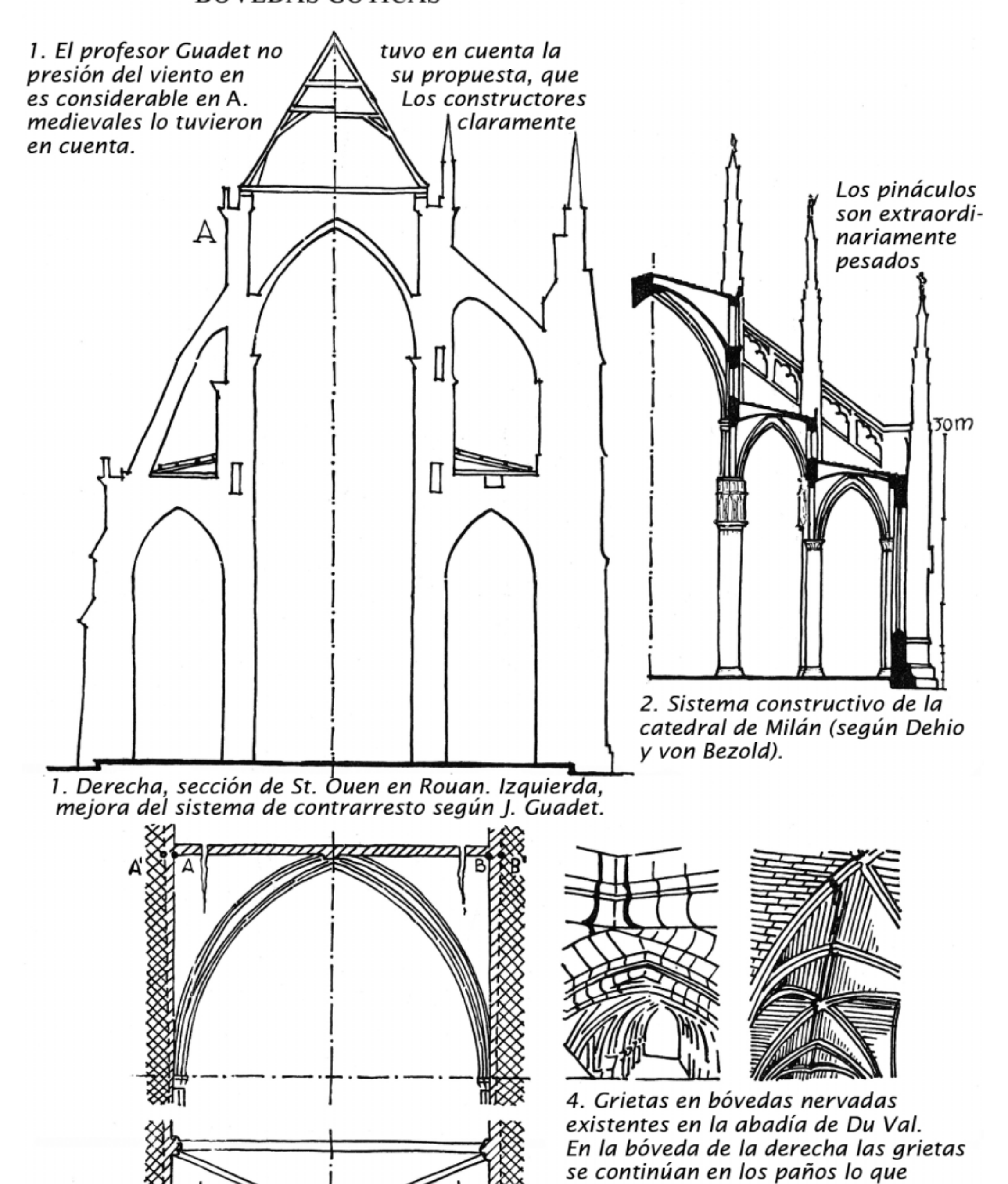
Según Hasak estos informes indican que los maestros partieron de un determinado método para poder llegar a esas conclusiones. En otras palabras: existían fórmulas que eran conocidas por los expertos con las que podían, mediante cálculos, fijar el peso de los estribos. En ellas, también sería tenida en consideración la resistencia de los materiales.

Con lo anterior parece estar de acuerdo la investigación que Mosmans cita para la construcción de la Sacramentenkapel de St. Jan en Den Bosch. Cuando se iba a realizar la bóveda reticulada de la capilla, la administración municipal quiso que primero se pidiera la opinión de algunos conocidos maestros extranjeros. Acudieron Herman de Amberes y Anthonis van Mechelen que estuvieron dos días midiendo y calculando in situ y que tras emitir su útil consejo, se volvieron a su ciudad de residencia.

Por el contrario el profesor Guadet pone en duda que los arquitectos medievales tuvieran métodos científicos para calcular o controlar con alguna precisión la magnitud y la dirección del empuje de las bóvedas. En su opinión, sólo podrían haber llegado a los resultados de sus experiencias a través del método de tanteos, y serían las muchas realizaciones las que les habrían enseñado como hacerlo correctamente.

Guadet tiene mucho respeto por el enorme potencial de los constructores medievales, pero es de la opinión de que un concienzudo conocimiento de la mecánica aplicada habría tenido gran influencia sobre sus construcciones y consiguientemente sobre las formas empleadas.

LÁMINA 75. SISTEMAS DE CONTRARRESTO GÓTICOS. GRIETAS EN BÓVEDAS GÓTICAS



1. Derecha, sección de St. Ouen en Rouan. Izquierda, mejora del sistema de contrarresto según J. Guadet.

2. Sistema constructivo de la catedral de Milán (según Dehio y von Bezold).

4. Grietas en bóvedas nervadas existentes en la abadía de Du Val. En la bóveda de la derecha las grietas se continúan en los paños lo que muestra que nervios y plementería están íntimamente unidos entre sí.

(3. según Abraham)

En esta bóveda de crucería aparecen grietas en F y F', grietas de Sabouret, a causa del cedimiento de los apoyos A y B que se desplazan hacia A' y B'.

Da como ejemplo la estructura de Sainte-Ouen de Rouen, que sometió a cálculos, y de los que resultaría que la forma de los arbotantes se tendría que haber realizado de forma más racional, mientras que, además, los estribos podrían haber sido más ligeros (Lám. 75, fig. 1).

Por otro lado, debe hacerse la observación de que en sus cálculos despreció la influencia del viento, de manera que si hubiera contado con él tendría que haber modificado su propuesta.

Los constructores medievales realizaron sus obras no sin humanas imperfecciones. Casi todas las iglesias góticas muestran grietas en las bóvedas y desplomes en los pilares y estribos.

El profesor americano W. H. Goodyear vio en estos desplomes un refinamiento de los constructores medievales; las columnas se inclinaban un poco en la parte alta hacia fuera por lo que los arcos perpiaños se convertían en arcos de herradura. «Así pues», decía él, «debido a ello, el efecto de perspectiva se mejora, puesto que las columnas ya no parecen inclinarse hacia adentro, lo que sí sería el caso sin esta corrección».

La presencia de grietas en las bóvedas, que aparecen sobre todo allí donde los pilares se inclinan, apunta sobre todo a defectos técnicos y no a refinamientos estéticos.

Diferentes autores han tratado también este tema, entre otros el arquitecto inglés J. Bilson, el maestro alemán M. Hasak y los arquitectos franceses V. Sabouret y P. Abraham.

Sabouret inició un exhaustivo estudio y a él debe el honor de que Abraham diera su nombre a dichas grietas en las bóvedas (Lám. 75, figs. 3, 4). Según Abraham la fuerza de una bóveda depende principalmente de la rigidez de los apoyos, de forma que es claro que sobre todo debe buscarse la solidez de los estribos y de las estructuras de contrarresto, y que su resistencia debe ser lo más alta posible.

4.6 La construcción abovedada en el Renacimiento y el barroco

En el Renacimiento se plantearon grandes desafíos arquitectónicos sobre todo por los intentos de cubrir amplios espacios con una cúpula central. En esa época estudiaron con pasión los antiguos monumentos romanos; al mismo tiempo, se asimilaron las enseñanzas adquiridas en la construcción de las estructuras góticas. Quizás tuvieron también su contribución las influencias más o menos directas de Bizancio y Persia. Los cálculos matemáticos tomaron gran importancia, sobre todo en la época barroca, para el dimensionado de las bóvedas y las estructuras de contrarresto; varios arquitectos famosos fueron matemáticos de gran capacidad.

En contraste con el gótico, en el Renacimiento los sistemas de contrarresto se dispusieron preferentemente en el interior del edificio. Es cierto que en algunos edificios se ven todavía contrafuertes, pero la mayoría de las veces se sustituyeron por elementos del edificio, por nichos, galerías, pasillos o naves laterales cubiertos con bóvedas, que con su masa se oponían al empuje lateral de las bóvedas principales (Láms. 76, 77). También se ataron con tirantes de hierro los apoyos de los espacios abovedados.

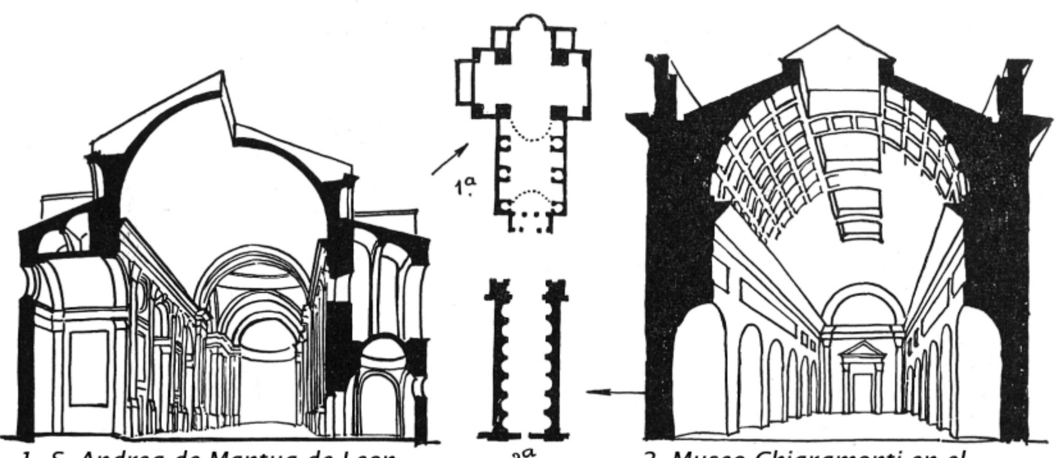
A menudo, también una serie de columnas sirvió como pilares de contrarresto. Las bóvedas nervadas múltiples del gótico, que fueron ampliamente empleadas sobre todo en el gótico tardío, dejaron de usarse siendo sustituidas por bóvedas de cañón con anchos arcos fajones y decoradas o no con casetones. Realmente, estas bóvedas de casetones son una especie de bóvedas nervadas; las gruesas bandas aseguran la rigidez de forma que los paños se pueden hacer más delgados.

Aunque en el Renacimiento se emplearon con frecuencia las bóvedas de cañón, se dio preferencia a las cúpulas, que se dispusieron incluso sobre pequeños espacios, como las naves laterales de las iglesias (Láms. 89–95).

En el barroco se llegaron a realizar estructuras muy ingeniosas. Los maestros constructores buscaron con afán alcanzar en sus edificios nuevas y magníficas impresiones espaciales.

El Renacimiento buscó el equilibrio, la armonía; los detalles se cuidaron y sopesaron y estuvieron en una determinada proporción con la totalidad del edificio; una tranquila majestuosidad fue el factor determinante. En el barroco por el contrario, este gran orden y reposo cedieron su lugar y fueron subordinados a la bús-

LÁMINA 76. SISTEMAS DE CONTRARRESTO EN LA CONSTRUCCIÓN ABOVEDADA DEL RENACIMIENTO Y EL BARROCO

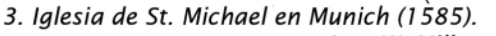


1. S. Andrea de Mantua de Leon Battista Alberti ca. 1500. La gran bóveda de cañón está contrarrestada por pequeñas bóvedas de cañón transversales y por potentes muros de estribo.

2. Museo Chiaramonti en el Vaticano de Roma (1817-22). El sistema de contrarresto se inspira en la Antigüedad, y está formado por gruesos muros con nichos. En la coronación de la bóveda se han colocado lucernarios. En la parte de los lucernarios la bóveda de cañón está sustentada por arcos planos tendidos en la dirección del eje de la bóveda.







3. Iglesia de St. Michael en Munich (1585). Arq. W. Miller

4. St. Trinité de París (1867). Arquitecto P. Ballu.



3b. Detalle de los nichos.

3. Esta formidable bóveda con 20 m de luz tiene sólo 0,24 m de espesor en la clave. Las capillas laterales, cubiertas con semicúpulas, sirven de contrarresto a la bóveda de cañón.

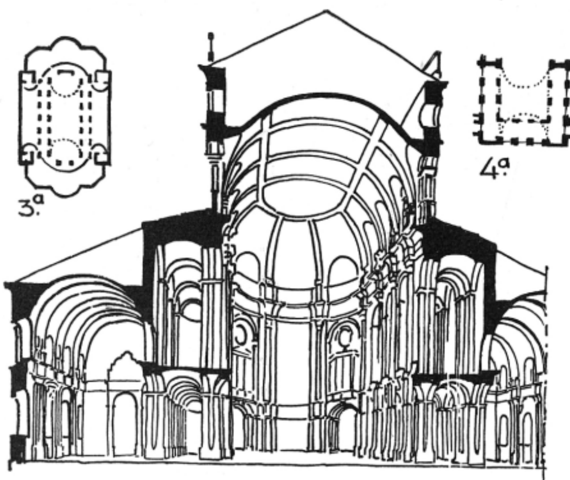
4. La bóveda de cañón en la nave central apoya sobre un sistema de pilares proporcionalmente débiles. La galería superior tiene dobles bóvedas. El sistema constructivo principal del edificio consta de los pilares de la nave unidos por muros transversales. En dirección longitudinal y transversal discurren arcos de enlace. (1-4 según H. Lömpel)

LÁMINA 77. SISTEMAS DE CONTRARRESTO EN LA CONSTRUCCIÓN ABOVEDADA DEL RENACIMIENTO Y EL BARROCO

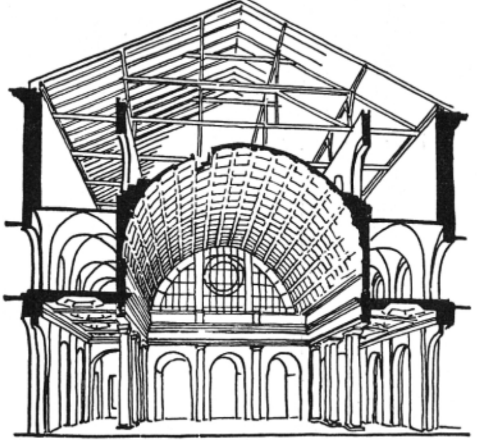


1. Interior de la iglesia de San Pedro de Roma. La bóveda de cañón está reforzada por arcos fajones de gran ancho. Las pequeñas cúpulas sobre las naves laterales contrarrestan la bóveda de cañón. Ésta está además reforzada por los lunetos. Los muros son gruesos de forma que resisten un cierto empuje. (1-4 según Lömpel)

2. Interior de la iglesia de S. Pedro de Bolonia. Las columnas colocadas por parejas están rígidamente unidas mediante bóvedas de cañón sobre las que descansa la bóveda de cañón de la nave principal. Ésta está contrarrestada por los lunetos sobre las ventanas y los contrafuertes exteriores.



3. Interior de la Hofkirche de Dresde. La bóveda apoya sobre un potente muro que recibe carga de la nave lateral, lo que le dota de una notable rigidez. El conjunto del edificio proporciona, con sus diferentes partes, un bello ejemplo de equilibrio obtenido por contrarresto mutuo.



4. Bóveda de la sala de pasos perdidos del Kurhaus de Wiesbaden. La gran bóveda está contrarrestada por las bóvedas de las galerías laterales superiores. Además, el peso completo de la cubierta cae sobre el arranque de la bóveda. El techo de piedra de las galerías inferiores refuerza el edificio.

queda de espacios impresionantes. Si al arquitecto le parecía necesario, la pureza de las partes se sacrificaba a este objetivo. Incluso se despreció el sentido funcional de las partes si con ello se podía aumentar el efecto del conjunto.

En apariencia, la construcción dejó de ser un problema. Las bóvedas se tendieron frecuentemente unas con otras de manera increíble, produciéndose todo tipo de intersecciones (Láms. 79–84, 87, 98).

Bóvedas cupuliformes de tenue curvatura se combinaban con bóvedas de cañón y anchos arcos fajones; bóvedas esquifadas y en artesa fueron profusamente empleadas en el abovedado de espacios alargados en vestíbulos y cajas de escalera. También se usaron cúpulas ovales, frecuentemente en combinación con bóvedas de cañón (Láms. 78–83).

La técnica de los constructores de bóvedas fue a veces insuficiente para realizarlas en fábrica, ejecutándolas, entonces, con encamonados de yeso.

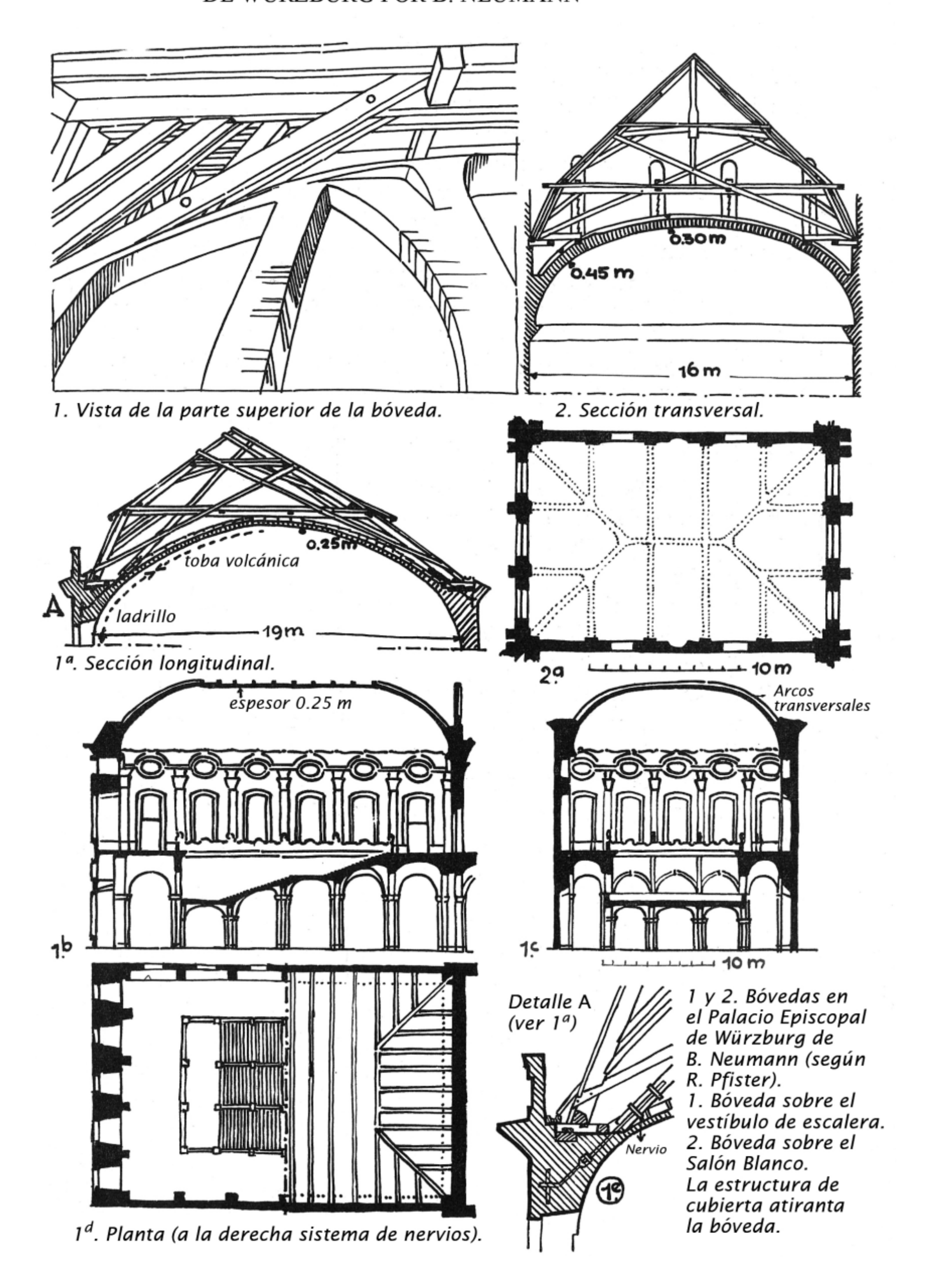
Se hicieron nuevos hallazgos. En el barroco francés hubo un extraordinario estudio del corte de la piedra que fue a la par con la búsqueda de nuevas construcciones abovedadas. Esto se corresponde con el carácter del pueblo francés amante de la lógica y gustoso de las formas que se obtienen con una base matemática. Los arquitectos más conocidos, como Philibert de l'Orme, P. Lescot, E. Mansart, J. Hardouin-Mansart, Ducerceau, y otros se regocijaron en la solución de todo tipo de bóvedas de piedra de complicadas formas, y todavía hoy podemos admirar la habilidad con la que superaron las dificultades (Lám. 87).

También se usaron elementos auxiliares de hierro y atirantados. Consiguieron además ejecutar bóvedas muy rebajadas. Pequeños vuelos en balcones y miradores se emplearon con predilección; la pechina y la trompa ganaron un puesto destacado en la arquitectura francesa.

La búsqueda de nuevas soluciones constructivas de bóvedas se puede ver en casi todos los países de Europa occidental; aquí también son de admirar numerosos hallazgos. En ese periodo se hicieron construcciones abovedadas que se encuentran entre las más formidables de todos los tiempos. Estas obras son de enorme interés para el arquitecto moderno, no tanto porque tales tipos de problemas todavía se le planteen, sino porque su estudio ayuda a mejorar la comprensión de la construcción.

Es verdad que hoy en día disponemos de otros materiales constructivos, que además las exigencias que se establecen son la mayoría de las veces diferentes

LÁMINA 78. BÓVEDAS SOBRE LA ESCALERA DEL PALACIO EPISCOPAL DE WÜRZBURG POR B. NEUMANN



1. Vista de la parte superior de la bóveda.

2. Sección transversal.

1ª. Sección longitudinal.

1d. Planta (a la derecha sistema de nervios).

1 y 2. Bóvedas en el Palacio Episcopal de Würzburg de B. Neumann (según R. Pfister).
1. Bóveda sobre el vestíbulo de escalera.
2. Bóveda sobre el Salón Blanco.
La estructura de cubierta atiranta la bóveda.

de las de los siglos anteriores, pero sin embargo, en esencia, los problemas de construcción son los mismos que aquellos que los maestros del Renacimiento y del barroco supieron resolver tan genialmente. Por tanto, un estudio profundo de estos problemas está plenamente justificado. Consiguientemente, nos detendremos algo más en estas grandes construcciones renacentistas y barrocas resaltando algunas importantes cuestiones tales como, por ejemplo, la importancia del uso de materiales homogéneos para los pilares y de las buenas cimentaciones en edificios cubiertos por pesadas bóvedas.

Bóvedas de cañón y esquifadas

La mayoría de las veces, las bóvedas de cañón y esquifadas tienen sección semicircular o de arco de circunferencia, aunque también las hay de sección oval; las bóvedas esquifadas son como norma más rebajadas que las de cañón (Lám. 76–88).

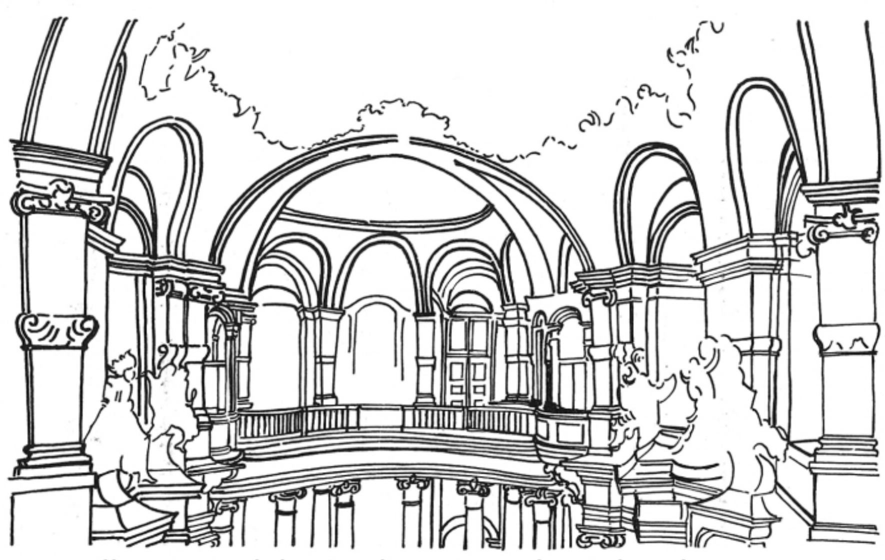
Estas bóvedas se pueden agrupar en tres grandes categorías:

1. Bóvedas masivas, pesadas, que en su forma exterior han sido evidentemente inspiradas en las de los romanos.
2. Bóvedas compuestas por cáscaras delgadas ya sea con ladrillos delgados, rasillas o placas de piedra, o con materiales huecos como vasijas o tubos cerámicos.
3. Bóvedas que constan de dos cáscaras que solamente se unen directamente una con la otra en la base y en la parte superior.

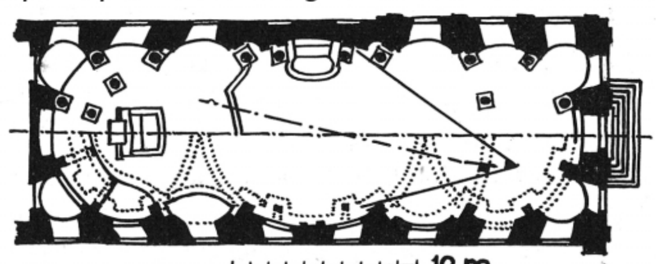
BÓVEDAS MASIVAS DE GRAN PESO: Las grandes bóvedas se construyeron tanto con ladrillo como con piedra; a veces ambos materiales se combinaron en la misma bóveda.

Naturalmente, un buen sistema de contrarresto es aquí una necesidad de primer orden, y se situó preferentemente en el interior del edificio; cuando fue posible, se evitó hacer pesados contrafuertes y estribos. Esta clase de bóvedas de cañón se empleó durante varios siglos. Se puede señalar un cierto progreso en la audacia y osadía con la que se colocaron los sistemas de contrarresto, pero este desarrollo no se puede poner, al igual que ocurrió en otros estilos, en un puro orden cronológico. Puesto que en estas consideraciones las cuestiones técnicas

LÁMINA 79. BÓVEDAS SOBRE LA CAPILLA PRINCIPAL DEL PALACIO EPISCOPAL DE WURZBURG POR B. NEUMANN



1. Capilla principal de Würzburg. Vista hacia la cabecera.



1a. Planta.

Atirantados

0.25 m

1^b. Vista del trasdós. *1^c. Sección transversal de las bóvedas.*

*1-1c. Capilla principal del Palacio Episcopal de Würzburg.
Construcción de la bóveda de Baltasar Neumann (ca. 1742).
Las bóvedas cupuliformes están formadas con ladrillos porosos.
Están contrarrestadas por lunetos y por los pesados muros reforzados con columnas y pilastras. (Según R. Pfister)*

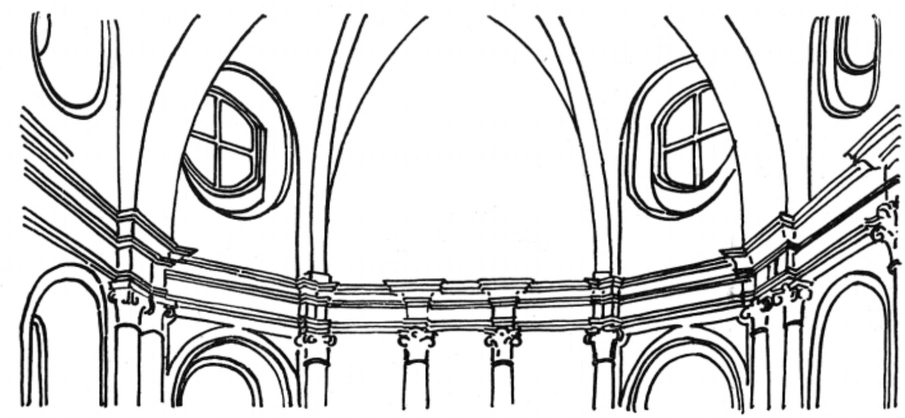
son primordiales, los monumentos no serán descritos en orden cronológico, sino que se atenderá a un desarrollo desde el punto de vista constructivo, o siguiendo el nacimiento de nuevas ideas estructurales.

A los anteriores tipos de construcciones pertenecen las bóvedas de cañón de San Pedro (Lám. 77, fig. 1) y de la iglesia del Gesú de Roma, esta última de Vignola, construida en 1570. Giovannoni opina que la iglesia del Gesú es desde los puntos de vista arquitectónico y constructivo un descendiente legítimo de las construcciones tipo salón romanas: la bóveda de cañón sobre la nave principal está contrarrestada por las capillas laterales adyacentes, y no a la manera gótica por estribos y arbotantes.

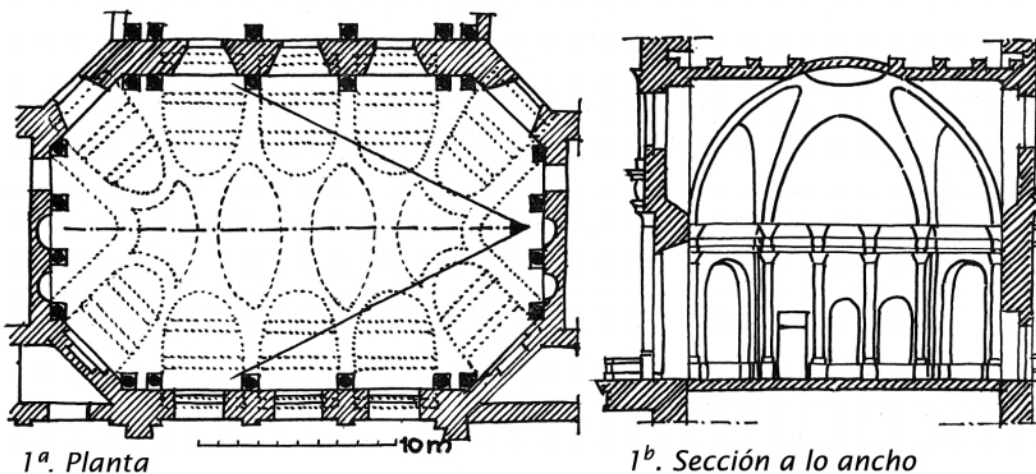
Muchos maestros italianos trabajaron también en otros países. Así, Gaetano Chiaveri fue encargado en 1738 de la construcción de la Hofkirche de Dresde (Lám. 77, fig. 3). Proyectó una atrevida construcción: la gran nave de veinte metros de luz, cubierta con una gran bóveda de cañón, estaba contrarrestada por las naves laterales que, divididas en dos pisos por una galería, proporcionaban un sólido contrarresto a la nave central. El abovedamiento precisó de especiales cuidados pues, aunque la bóveda era sólo de 23 cm de espesor, el empuje ejercido era considerable, necesitándose un buen sistema de estribo. Éste se realizó con un conocimiento constructivo fuera de lo común. En primer lugar, la bóveda de cañón, situada a gran altura, se contrarrestó de excelente manera con las bóvedas de las naves laterales, que, como sistema intermedio, contribuyeron notablemente a la solidez de la iglesia. Estas naves laterales son el verdadero esqueleto constructivo del edificio ya que forman la transición entre la bóveda de cañón sobre la alta nave central y los muros exteriores.

Además, el arquitecto levantó los pesados muros exteriores hasta la altura del arranque de la bóveda, aumentando la estabilidad. La resistencia frente a los sobrecogedores empujes laterales en el arranque de la bóveda, por cierto el punto más débil, se reforzó aumentando la carga en estos puntos, carga suministrada por el peso de las bóvedas de las naves laterales, que se elevaban apoyadas sobre un tupido sistema de pilares. Los muros de la nave principal recibieron pues una gran carga repartida que sirvió como contrarresto a la acción hacia el exterior de la gran bóveda de cañón.

LÁMINA 80. BÓVEDAS SOBRE LA SALA DEL KAISER EN EL PALACIO EPISCOPAL DE WÜRZBURG POR B. NEUMANN

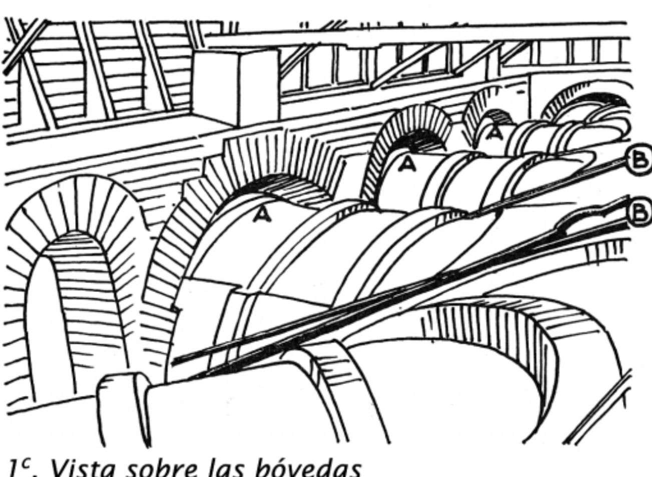


1. Vista hacia el lado menor de la sala



1^a. Planta

1^b. Sección a lo ancho



1^c. Vista sobre las bóvedas

1-1c. Sala del Kaiser del Palacio Episcopal de Würzburg. Bóveda de Balthasar Neumann (1742). Esta bóveda cupuliforme está constituida por ladrillos cerámicos porosos con un espesor de aproximadamente 0,25 m. Está provista de un sistema de nervios de refuerzo. Profundos lunetos cortan la bóveda. Para prevenir asientos, las bóvedas de los lunetos se han dejado separadas del muro que soporta la estructura de cubierta. Dicho muro está atado por fuertes tirantes (ver A y B en 1^c), (planta según R. Pfister).

Sobre las vistas se ha eliminado la ricamente ornamentada decoración que produce en estas bóvedas barrocas la impresión de un elegante refinamiento. Éste está en realidad en contraposición con la robustez y solidez del conjunto constructivo de las bóvedas, las cuales sin embargo – vistas las grandes luces – se realizaron de forma relativamente delgada y ligera.

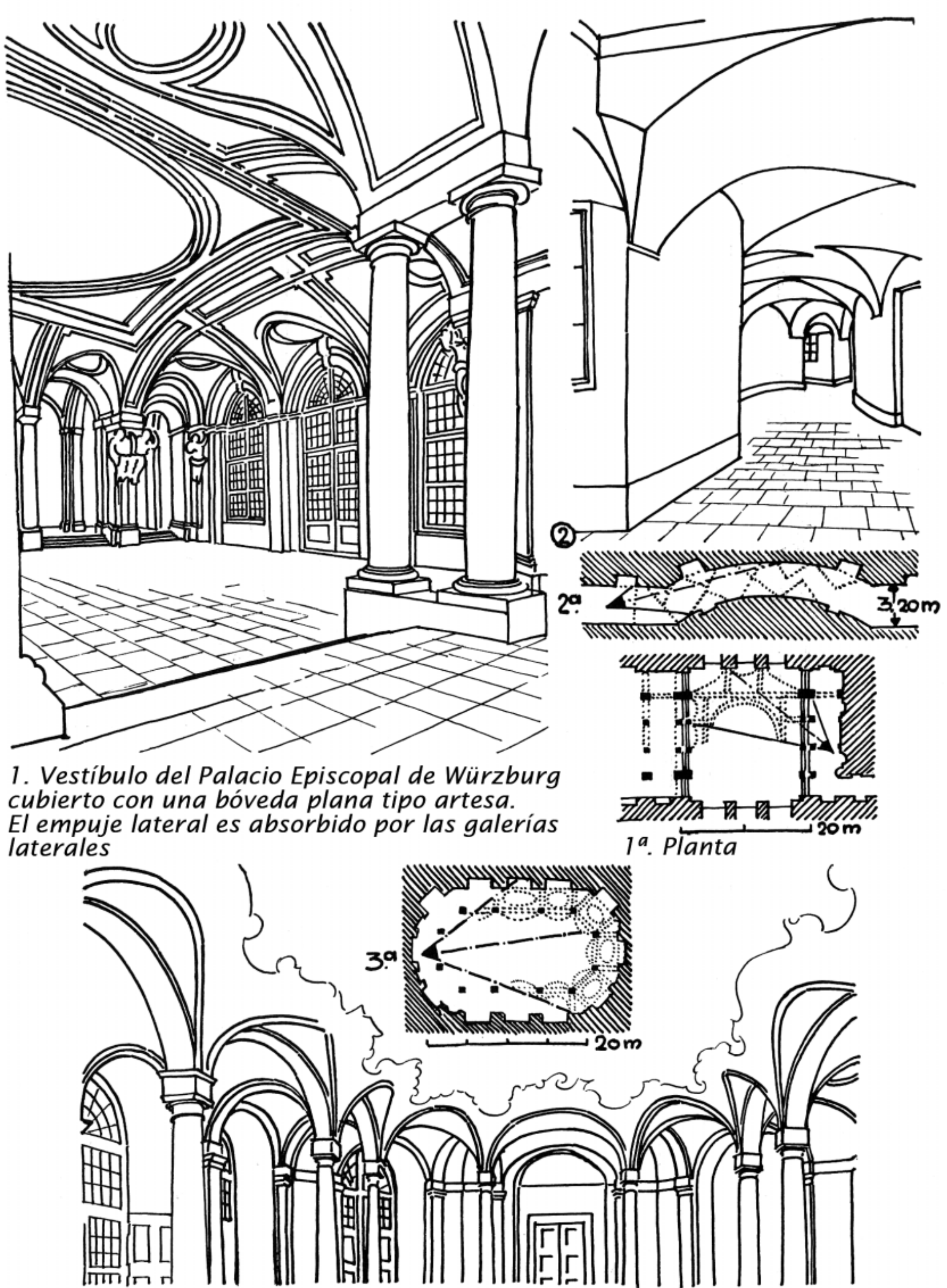
Las aperturas de luz se realizaron mediante lunetos que proporcionaron a la bóveda de cañón una rigidez muy favorable. Durante la construcción se dudó de la solidez de esta construcción; temerosos de posibles asientos, se esperaron cinco meses tras la terminación la bóveda antes de retirar las cimbras. Se había pronosticado que la iglesia colapsaría y, a pesar de un informe pericial, que durante la ejecución ratificó la fiabilidad de la forma de trabajo seguida, el arquitecto perdió la dirección de la obra.

Otra bóveda notable es la que cubre la sala de pasos perdidos del Kurhaus de Wiesbaden (Lám. 77, fig. 4); la estructura no es visible, oculta por la propia bóveda, pero su disposición queda totalmente aclarada mediante una sección. En efecto, a primera vista, la bóveda no parece tener sistema de contrarresto, pero cuando se estudia la sección resulta que la galería lateral juega un papel fundamental como estribo del espacio central. Esta galería consta de dos pisos; el inferior rigidiza el muro y el superior, cubierto con bóvedas de arista, proporciona el contrarresto a la bóveda de cañón de la ancha sala central. Además, los muros exteriores sobresalen por encina de los arranques y están cargados con el peso de la cubierta, por lo que en el aspecto estático mejoran aún más la estabilidad.

En la iglesia de St. Michael de Munich nos encontramos una bóveda de cañón que, con una luz de 20 m, pertenece a las más formidables de entre las grandes bóvedas (Lám. 76, fig. 3). Esta iglesia fue construida por el neerlandés Frederik Sustris van Venetië. Más tarde la iglesia fue ampliada con lo que se modificó radicalmente. No es seguro, sin embargo, a quien corresponde el honor de la construcción de la bóveda, a Sustris o a Wolfgang Miller nacido en Augsburg en 1537. Los muros exteriores estaban reforzados en el proyecto original por construcciones en forma de nicho (Lám. 76, fig. 3^{b}); el empuje lateral de la gran bóveda de cañón es resistido por bóvedas de cañón transversales sobre los citados nichos laterales.

Un constructor de bóvedas extraordinariamente dotado fue el arquitecto de Würzburg, Balthasar Neumann, nacido en 1687 en Eger (Láms. 78–84). Neumann pertenece a los arquitectos versados en ciencias y había disfrutado de una formación en el cuerpo de ingenieros. Durante toda su vida mantuvo un interés activo en los problemas de la construcción de bóvedas. Como ingeniero dio lo mejor de sí sobre todo en la construcción de la residencia episcopal de Würzburg, en donde

LÁMINA 81. BÓVEDAS SOBRE EL VESTÍBULO, PASILLOS Y SALÓN DEL JARDÍN DEL PALACIO EPISCOPAL DE WÜRZBURG POR B. NEUMANN



1. Vestíbulo del Palacio Episcopal de Würzburg cubierto con una bóveda plana tipo artesa. El empuje lateral es absorbido por las galerías laterales

1ª. Planta

3. Salón del jardín con bóveda de tipo esquifada. 3ª. Planta

2. Pasillo curvo con bóveda de cañón rebajada y profundas bóvedas de luneto.(Plantas según R. Pfister)

bajo la dirección del arquitectónicamente instruido príncipe de la iglesia colaboró con dotados maestros constructores como el teniente coronel Welch, Johann Lucas von Hildebrandt y otros.

Desde el punto de vista de la técnica constructiva este palacio es de tal perfección que sobresale con mucho sobre el trabajo normal de la época; en muchos aspectos puede tomarse como ejemplo para la técnica moderna. Todos los grandes espacios del palacio se abovedaron. La construcción de la bóveda del espacio de la escalera muestra, en particular, una gran pericia. Tiene una luz a lo ancho de 19 m y una flecha de 5,50 m; el espesor de los paños de la bóveda varía de 25 á 33 cm. Anchos arcos transversales (65 cm) dividen la bóveda, que fue construida de ladrillo hasta unos cuatro metros sobre el arranque y, después, con toba volcánica (Lám. 78, fig. 1–2).

Cuando el experimentado maestro Hildebrandt vio la bóveda en plena construcción afirmó: «Me dejo colgar si esta bóveda se mantiene en pie». Pero Neumann estaba tan seguro de su trabajo que ofreció disparar una pieza de artillería sobre ella.

La construcción de la armadura de cubierta juega un importante papel ya que une los muros sólidamente. Además se colocaron tirantes. (Las famosas pinturas murales de Tiépolo se ejecutaron sobre esta bóveda.) El resto de bóvedas del palacio se construyeron todas con ladrillos porosos. Las armaduras de cubierta son, como se ha dicho, verdaderas obras maestras de la técnica y cumplen una importante tarea en la estabilidad del conjunto. A pesar de las limitadas alturas, Neumann supo cómo hacerlas sólidas de manera que pudieran servir como atado rígido de los muros. Las bóvedas fueron ejecutadas después de que se cubriera el edificio. Se elaboraron sobre cimbras que a veces se tuvieron que dejar durante un largo tiempo, sobre todo si las dos salas anexas se tenían también que abovedar.

La bóveda sobre la capilla principal es también muy interesante (Lám. 79). Está compuesta de una serie de cúpulas discurriendo fusionadas unas dentro de otras y que, con la colocación de lunetos sobre los encuentros de las cúpulas, llega a formar una especie de bóveda de cañón.

Hay que resaltar también la bellas bóvedas rebajadas existentes en las otras salas y vestíbulos (Láms. 80–83), y la inteligente manera en que se abovedaron los espacios de servicio como pasillos y cajas de escalera.

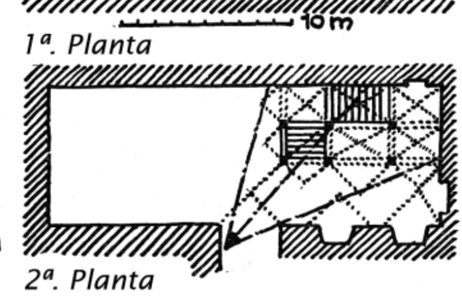
LÁMINA 82. BÓVEDAS SOBRE CAJAS DE ESCALERA EN EL PALACIO EPISCOPAL DE WÚRZBURG POR B. NEUMANN



1. Vestíbulo abovedado de escalera en el Palacio Episcopal de Würzburg



2. Idem sobre el piso inferior. Estas bóvedas fueron realizadas por B. Neumann (1741)



1ª. Planta

2ª. Planta

Estas bóvedas muestran una excepcional habilidad por parte del maestro constructor. Sobre los anchos pasillos tendió una bóveda oval; en 1 con profundos lunetos. Sobre los pilares junto a la escalera de dos metros de ancho apoyan pequeñas bóvedas que empujan sobre las bóvedas más anchas. Estos espacios secundarios adquieren un aspecto monumental gracias al abovedado (Plantas según Pfister)

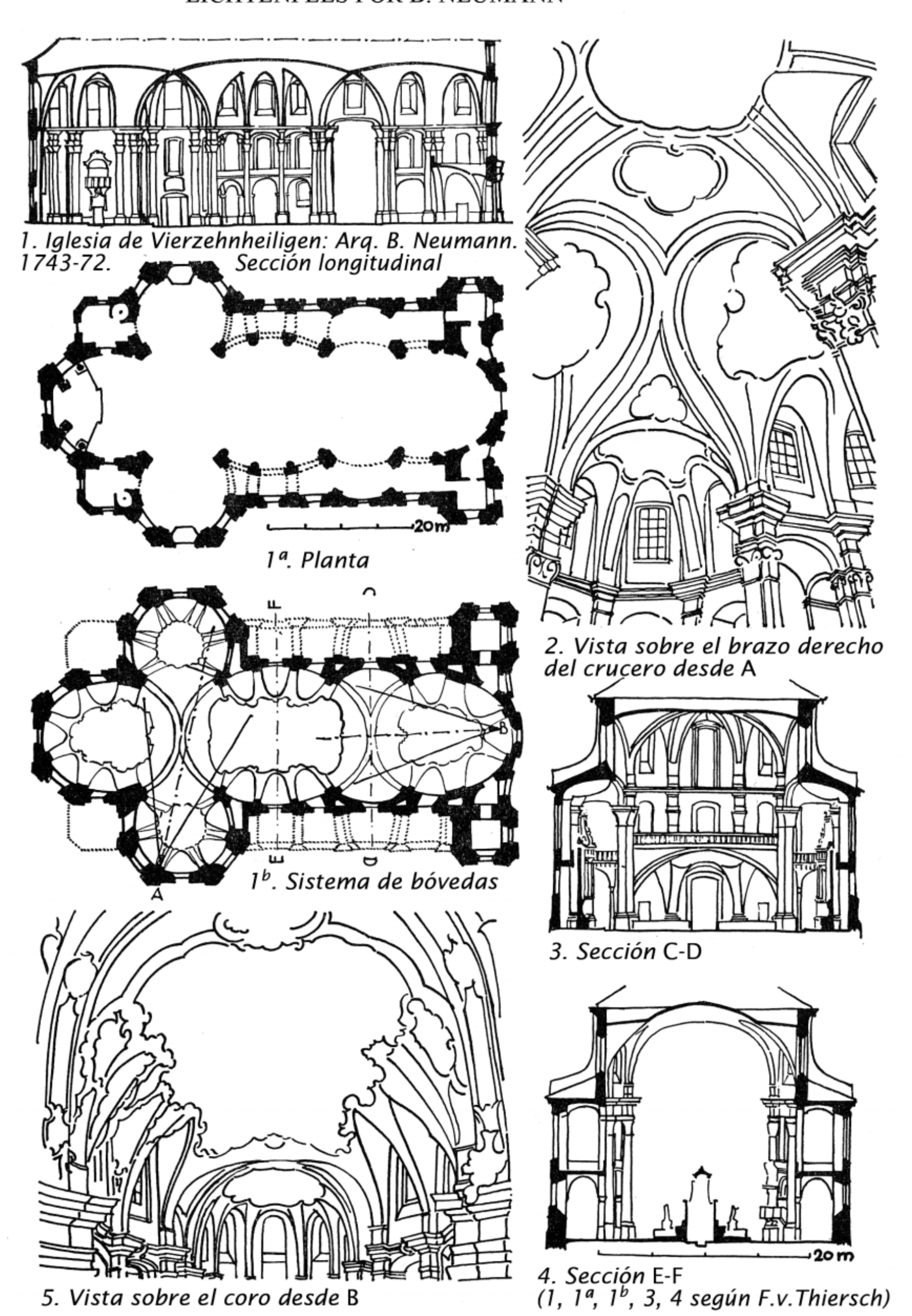
Casi aún más maestría testimonia el abovedado de la iglesia de peregrinación de Vierzehnheiligen en Lichtenfels (Lám. 83), donde las bóvedas conforman un espacio articulado rítmicamente que se cuenta entre lo mejor del barroco. Neumann resolvió increíbles complicaciones de forma aparentemente sencilla; nunca hubo mayor competencia técnica dedicada al gran problema del barroco, la creación de espacios de celebración. La longitud total del sistema de bóvedas es de 64 m, el ancho total en el crucero de 40 m y en la zona de la nave de 29 m. La gran bóveda no es muy pesada; el grosor en la coronación de la bóveda intermedia es de 40 cm y en las bóvedas de lunetos de unos 25 cm. En general, las bóvedas sobre las galerías son muy rebajadas, mientras que las tres cúpulas son bastante peraltadas.

La gran audacia de este abovedado se hace evidente al comprobar que las tres grandes cúpulas no descansan en apoyos fijos en toda su base sino también parcialmente en bóvedas intermedias, realmente porciones de bóvedas que en el crucero apoyan a su vez en cúpulas, y en el medio de la nave sobre bóvedas muy rebajadas tendidas sobre las galerías. Además, no se debe olvidar que las secciones de los pilares en la nave principal no se corresponden completamente con las de los pilares y muros situados sobre la galería, de manera que estos últimos pilares y muros descansan en parte sobre las citadas bóvedas rebajadas. Las tres grandes cúpulas ovales sobre la nave forman el abovedado principal. En el crucero y en la zona de tangencia de los óvalos se suman otras cuatro bóvedas, a saber, dos grandes cúpulas y dos paños de bóvedas semejantes a lunetos.

Especialmente osada es la construcción del crucero. Las dos grandes cúpulas sobresalen tanto hacia delante en el crucero que son tangentes entre sí. Estas partes voladas están apoyadas en arcos transversales que casi se alzan en forma helicoidal, presentando una pronunciada curvatura en proyección horizontal. Los lunetos aseguran la estabilidad de las bóvedas. Estos lunetos con arcos fajones situados tanto en el crucero como en el medio de la nave longitudinal, se pueden comparar con bóvedas de crucería dotadas de nervios de gran anchura.

El maestro constructor tuvo que conseguir el equilibrio de las fuerzas de empuje; tuvo que compensar el empuje de las bóvedas grandes contra las pe-

LÁMINA 83. BÓVEDAS DE LA IGLESIA DE VIERZEHNHEILIGEN EN LICHTENFELS POR B. NEUMANN



1. Iglesia de Vierzehnheiligen: Arq. B. Neumann. 1743-72. Sección longitudinal

1ª. Planta

1ᵇ. Sistema de bóvedas

2. Vista sobre el brazo derecho del crucero desde A

3. Sección C-D

4. Sección E-F
(1, 1ª, 1ᵇ, 3, 4 según F.v.Thiersch)

5. Vista sobre el coro desde B

queñas siendo naturalmente mayor el de las primeras que el de las segundas. No se le puede reprochar que no lo consiguiera completamente. El conjunto es tan complicado, las dificultades son tan numerosas, que se enfrentó a una tarea casi desesperada. Surgieron grietas en la unión de la cúpula central con las bóvedas colindantes, aproximadamente en la mitad de la nave. Los lunetos, aquí muy débilmente curvados, cedieron algo bajo la presión bastante vertical de la cúpula principal. Estas grietas se reprodujeron sobre todo en la dirección longitudinal de la iglesia. Los muros de la iglesia eran bastante pesados pero no poseían suficiente masa para resistir el empuje lateral. Además, la carga de los muros sobre las bóvedas actúa aquí de forma poco favorable.

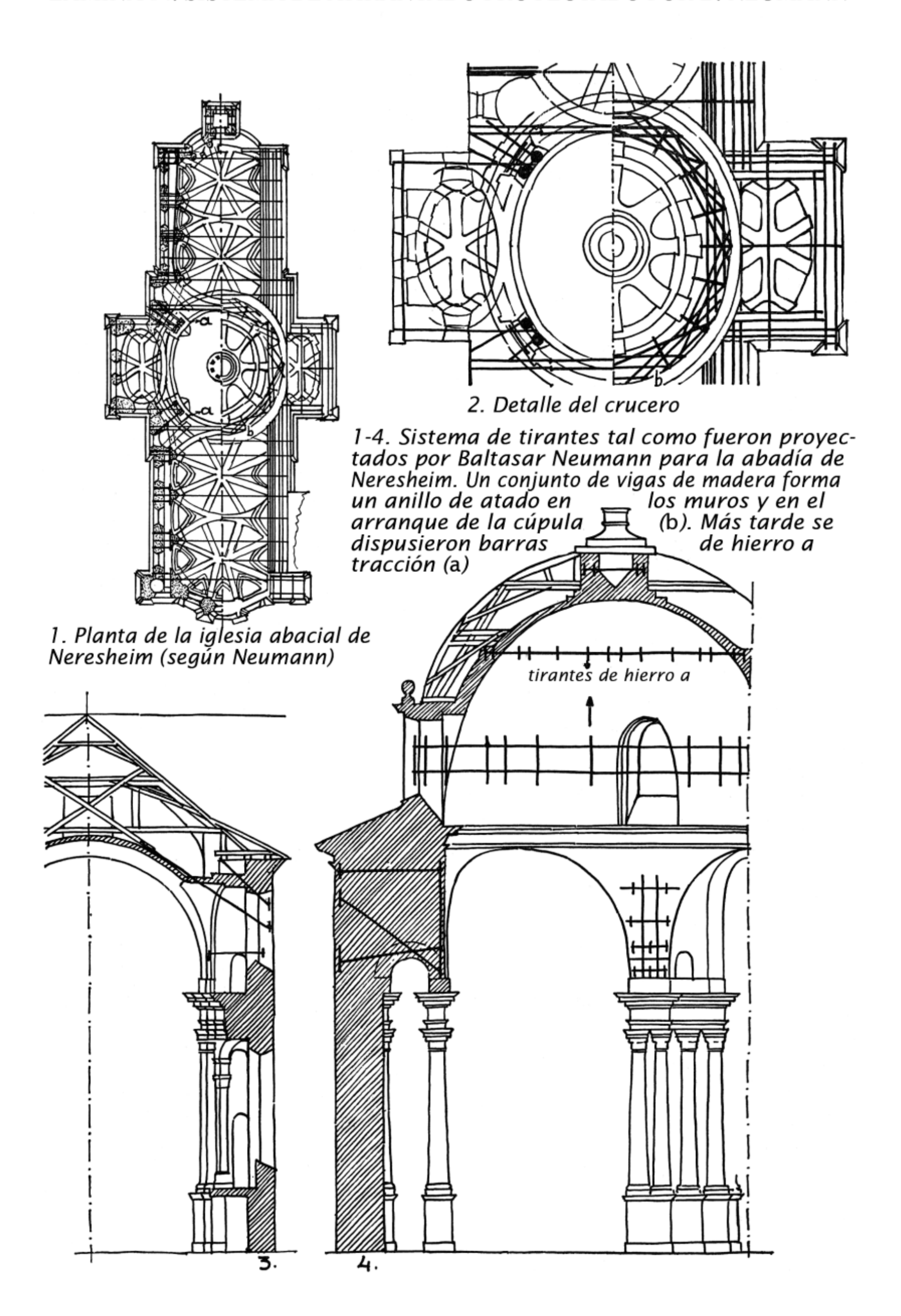
Por otra parte, el efecto de contrarresto es excelente ya que las galerías trabajan como contrafuertes que suministran el peso necesario contra el empuje lateral de las bóvedas. Neumann no dirigió la ejecución por completo y tuvo que confiar en hábiles colaboradores.

Bajo las bóvedas se colocó primero una cimbra continua sobre la que se levantaron las bóvedas con piedra de toba y mortero de buena calidad. Por el trasdós las bóvedas se recubrieron con una capa lisa de yeso para dotarlas de un buen aislamiento en caso de fuego; cuando toda la bóveda hubo endurecido se retiraron las cimbras cuidadosamente. Se han conservado los dibujos de la iglesia que Neumann construyó en Nereshein donde se muestran los atirantados de hierro que se colocaron en, y por encima de, las bóvedas (Lám. 84). En Vierzehnheiligen, de forma análoga, también se hizo un amplio uso del hierro.

BÓVEDAS DELGADAS DE LADRILLO, DE PLACAS DE PIEDRA O TUBOS HUECOS: En Italia y España la construcción de bóvedas tabicadas con ladrillos delgados (rasillas) se mantuvo durante el Renacimiento. Este método se remonta a los romanos aunque se desarrolló con características propias, pues las bóvedas se hicieron sin trasdosarlas con hormigón, como era la costumbre romana. Las bóvedas del claustro de San Marcos de Florencia, de sección oval, tienen una luz de 3,60 m y 6 cm de espesor; constan de dos hojas de rasillas unidas.

En Francia, este tipo de bóvedas se ejecutaron frecuentemente con mortero de yeso. Con bóvedas de hojas verticales de ladrillo tomadas con yeso se cubrieron

LÁMINA 84. SISTEMA DE ATIRANTADO PROYECTADO POR B. NEUMANN



2. Detalle del crucero

1-4. Sistema de tirantes tal como fueron proyectados por Baltasar Neumann para la abadía de Neresheim. Un conjunto de vigas de madera forma un anillo de atado en los muros y en el arranque de la cúpula (b). Más tarde se dispusieron barras de hierro a tracción (a)

1. Planta de la iglesia abacial de Neresheim (según Neumann)

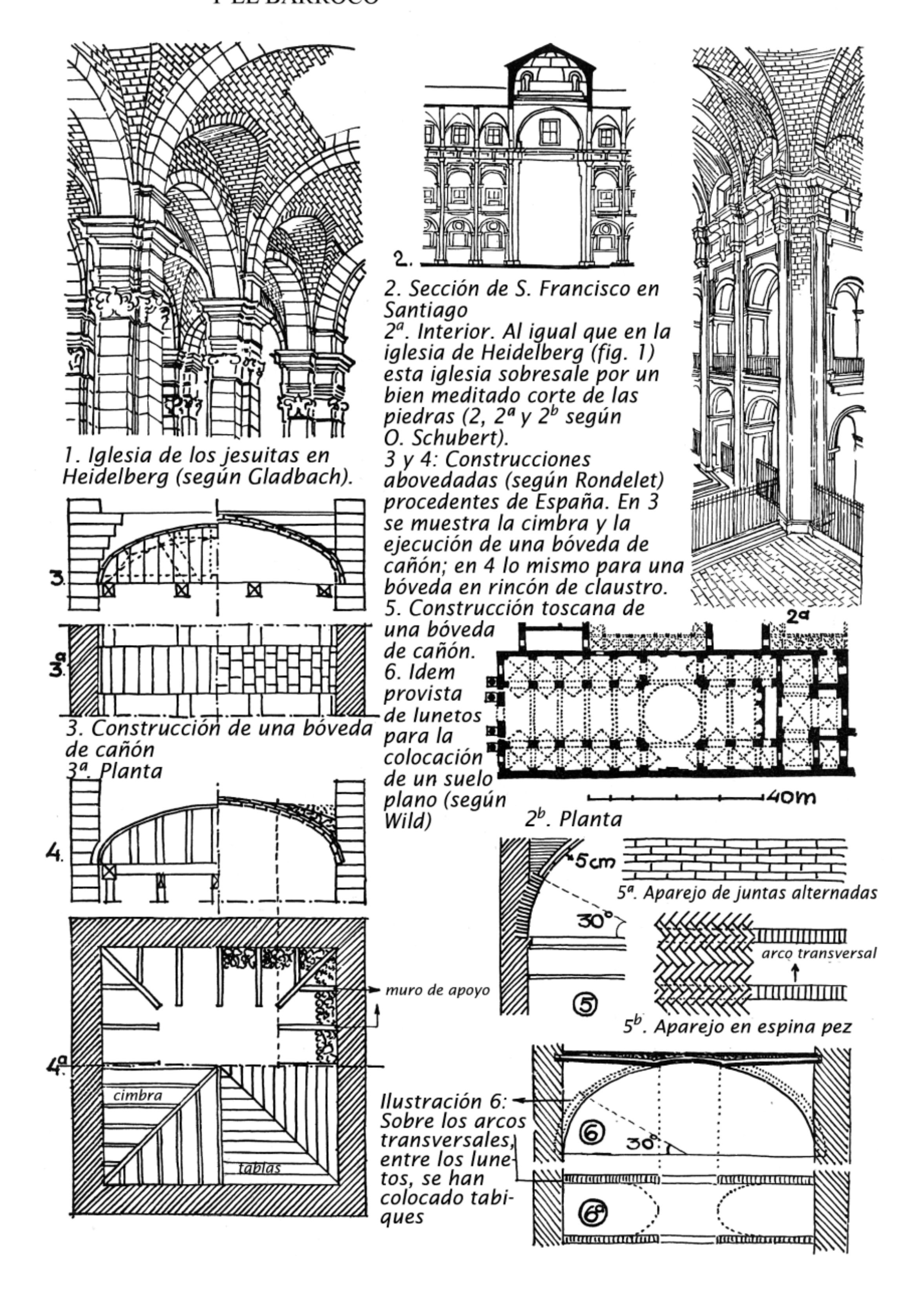
las salas del antiguo Departamento de Guerra de Versalles, que tienen una superficie de unos 6 × 8 m^2. Los arranques se rellenaron con fragmentos de ladrillo de pequeño tamaño aglomerados con yeso; un par de tirantes de hierro une los muros enfrentados entre sí. Después se recubrió con una capa de ladrillos. Puesto que la flecha de estas bóvedas escarzanas era de sólo un cuarto de la luz no eran excesivamente pesadas. Era preciso reducir la carga, ya que había cinco pisos unos encima de otros. Las bóvedas se construyeron con una cimbra móvil de un metro de ancho, que se desplazaba sobre un par de vigas horizontales ancladas a los muros (Lám. 85, figs. 3, 4).

Rondelet, el competente arquitecto francés cuya obra clásica sobre la construcción de bóvedas tiene todavía valor práctico en la actualidad, describe en ella este método de trabajo, aunque da, con mucho, preferencia a la ejecución de fábricas con mortero de cal sobre las de yeso. También es de la opinión de que es mejor una cimbra fija continua, pues el desplazamiento de la cimbra móvil puede ocasionar daños y no proporciona ninguna ventaja práctica digna de mención.

El Mariscal de Belle-Isle fue, según Rondelet, el primero que en Francia hizo construir bóvedas tabicadas, cuando estudiaba una forma de reconstruir la cubierta de unos establos tras un gran incendio. Había visto hacer este tipo de bóvedas en la región del bajo Pirineo a los maestros de la zona, donde se empleaban desde tiempo inmemorial. Hizo traer albañiles de la región y les puso a trabajar en el abovedado de espacios de 10 × 40 m^2 con bóvedas carpaneles de cañón, para los establos de su castillo en Bisy. Los muros tenían un espesor de 82 cm y ya habían sido terminados un año antes. Para los arranques se habían preparado rozas de espera de 16 cm de profundidad. Se empleó una cimbra móvil que podía deslizar sobre sólidas vigas inferiores bien ancladas a las paredes. Después de que la citada roza se limpió y humedeció, se colocó sobre la cimbra la primera hilera de ladrillos de plano con mortero de yeso. Cada ladrillo se sumergió primero en agua antes de colocarse.

Tras haber colocado así las primeras dos o tres hiladas, se puso una segunda capa con las juntas desplazadas, esto es, a matajunta. Los ladrillos se sentaban con un ligero golpe de piqueta. Los albañiles estaban de pie sobre un andamio al nivel de la bóveda, y comenzaban por ambos lados a la vez. Los últimos la-

LÁMINA 85. BÓVEDAS DE CAÑÓN Y LUNETOS EN EL RENACIMIENTO Y EL BARROCO



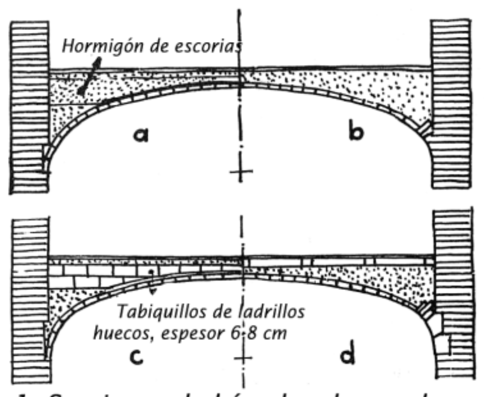
drillos se sentaban con especial cuidado; después se rellenaban las bóvedas y se continuaba con el siguiente paño adyacente al anterior. Estas bóvedas resultaron ser increíblemente sólidas. Sobre una de ellas se dejó caer, desde una altura de unos tres metros, una piedra de 4.000 kg; la piedra perforó la bóveda, pero el resto permaneció intacto a pesar del estremecimiento que causó la caída.

En 1754 el conde d'Espie escribió un libro sobre este tipo de bóvedas en la que cita diferentes acontecimientos que demuestran su solidez. Así, por ejemplo, en Languedoc un noble hizo construir una bóveda sobre muros antiguos de los que uno de ellos con el paso del tiempo perdió el equilibrio y se vino abajo, de manera que la bóveda, apoyada solamente en tres lados, quedó colgada en el aire. Los albañiles que fueron llamados al lugar no se atrevieron al principio a comenzar la tarea, pero cuando en los días siguientes vieron que la bóveda todavía se sostenía, demolieron el muro antiguo y construyeron en su lugar uno nuevo bajo la bóveda. Según Rondelet, el propio d'Espie hizo la siguiente prueba. Mandó construir una bóveda en rincón de claustro sobre un cuadrado de 8 metros de lado. Apenas se terminó, hizo colocar en el medio una carga de 20.000 kg que permaneció durante dos días. Aunque la bóveda no tenía relleno no resultó deformada por esta carga. Aunque el ensayo demuestra la gran resistencia, de estas bóvedas, Rondelet aconseja colocar un atirantado a fin de evitar con él las consecuencias de una mala ejecución. También opina que las bóvedas esquifadas son más fuertes que las de cañón, a causa de la curvatura que tienen en las dos direcciones principales, razón también por la que observó que éstas se empleaban preferentemente en la construcción de bóvedas tabicadas. Normalmente se construían como refuerzo pequeños tabiques transversales entre las bóvedas y los muros exteriores; posteriormente se rellenaban los arranques con echadizo.

El método italiano no difiere mucho del que se ha descrito aquí arriba. Estas bóvedas delgadas se hacen sobre todo en la Toscana siendo llamadas *volterrane* (Lám. 86). El arquitecto Wild (1856) describió su ejecución, elogiándolas por su economía.

En 1941 el profesor Carl Sattler hizo un estudio de estas bóvedas ligeras italianas, «en atención al ahorro de madera y hierro que las circunstancias de guerra

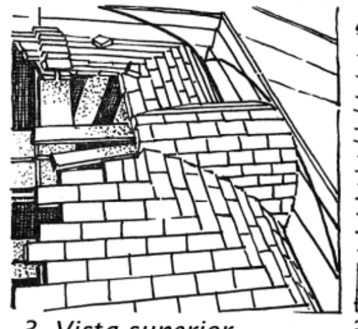
LÁMINA 86. SISTEMAS ABOVEDADOS CON ESPESORES DELGADOS EMPLEADOS EN ITALIA

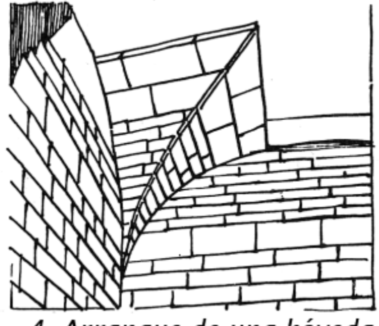


1. Secciones de bóvedas de prueba según el profesor Carl Sattler. Constan de ladrillos de 4-6 cm de espesor y se trasdosan con hormigón o fábrica



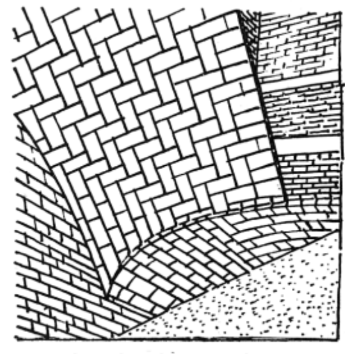
2. Las bóvedas se realizan sin cimbra con la guía del largo de un cordel; los ladrillos frescos se mantienen un tiempo en su posición con ayuda de un alambre de acero y una piedra



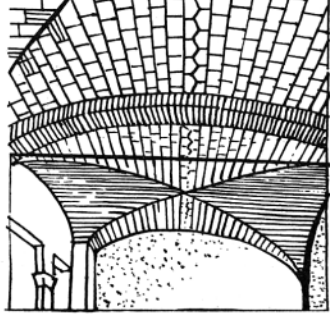


3. Vista superior   3ª. Vista inferior. La bóveda en rincón de claustro con lunetos está realizada con rasillas de 3 ½ cm. Unos tablones sobre ladrillos apilados unos encima de otros cimbran el luneto. En el encuentro, los ladrillos se sujetan alternándose y encajándose unos con los otros

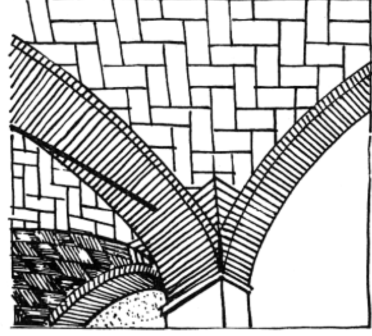
4. Arranque de una bóveda de arista. Un conjunto de hiladas se disponen en horizontal (con voladizos)



5. Bóveda de escalera. Los ladrillos tienen parcialmente aparejo de espina pez (Instituto de agricultura de Florencia)



6. Bóveda de arista rebajada. En la coronación los ladrillos están dispuestos encajándose unos con los otros. En la arista diagonal se colocan cada tres ladrillos algunos en posición vertical



7. Bóveda de arista con aparejo de espina pez ejecutada libremente a mano (sin cimbra)

hacen necesario», con vistas a su empleo en Alemania. Sattler construyó varias de estas bóvedas tanto con mortero de yeso como con mortero de cemento de fraguado rápido.

Las bóvedas volterranas italianas, tal y como también hoy en día se siguen construyendo, se hacen preferentemente con yeso y sin hacer uso de cimbra. Solamente a distancias de unos 3 m, se coloca un arco de camones, formado por tablas de 3 cm; entre los arcos se tienden cuerdas con las que se determina la correcta alineación. La proporción del espesor de los muros de apoyo y la luz a cubrir para este tipo de bóvedas es como sigue:

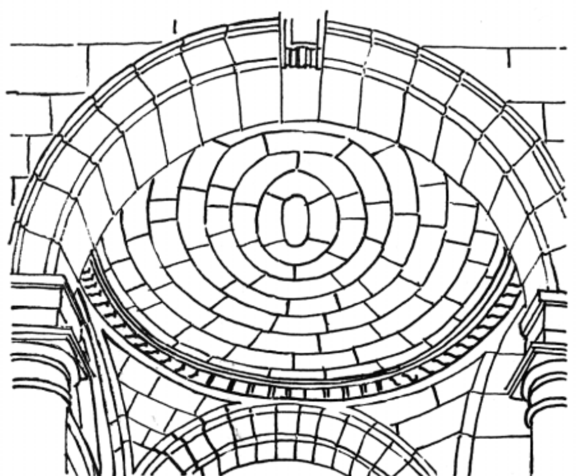
Luz de la bóveda:	espesor de muro:
4,00 m	0,30 m
5,50 m	0,58 m
11,50 m	0,80 m
15,00 m	0,88 m

La flecha no se hace menor que un cuarto de la luz; para luces mayores se colocan tirantes de hierro. Hasta un ángulo de treinta grados con el plano de los arranques de la bóveda se ejecutan con fábrica de medio pie de ladrillo; por encima, los ladrillos, de unos 5 cm de espesor, se colocan de plano, con juntas alternadas o a espina pez. Este último aparejo es el mejor, pero exige habilidosos albañiles y ladrillos perfectamente planos (Lám. 85, fig. 5; Lám. 86, figs. 5, 7). Las bóvedas se refuerzan con arcos transversales tabicados de capas de ladrillos de plano tomados con yeso, mientras que los arranques se rellenan con ladrillo aglomerado con cal, arena y yeso (Lám. 85, figs. 5, 5[b]).

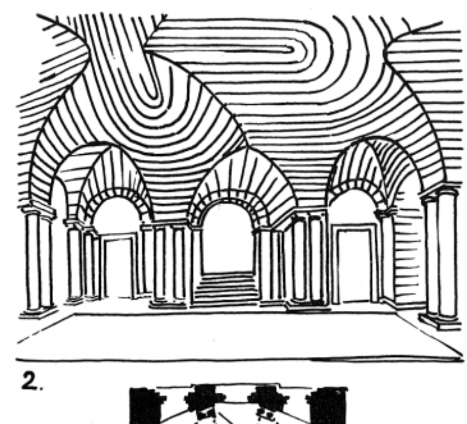
Si la bóveda tiene que servir como soporte de un suelo entonces normalmente se tienden lunetos entre los arcos transversales y se enrasa después la bóveda. Los arcos transversales resultan ser tan fuertes que se pueden colocar sobre ellos ligeros tabiques (Lám. 85, figs. 6, 6[a]).

Se exige una alta calidad para el yeso. Se obtiene por calcinación de alabastro y se trabaja puro. El albañil tiene en la mano una artesa de madera de 50 × 50 cm con un borde alrededor de 6 cm de alto. En ella pone tanta agua como sea necesaria para preparar yeso para tres ladrillos. Entonces toma muy cuidadosamente

LÁMINA 87. MÉTODOS DE ABOVEDADO DEL RENACIMIENTO Y EL BARROCO



1. Cúpula sobre pechinas del arquitecto barroco francés Victor Louis. Esta bóveda muestra una muy cuidada estereotomía. Es muy plana y fue realizada en piedra (1762)

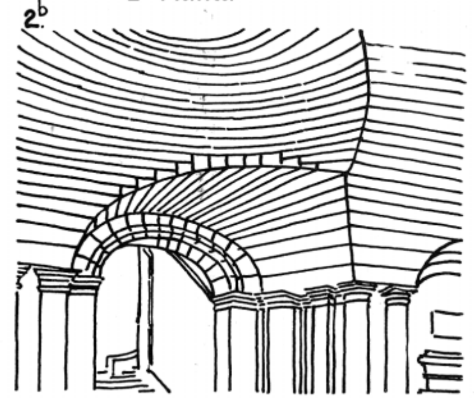


2.

10 m

2ª Planta

2b

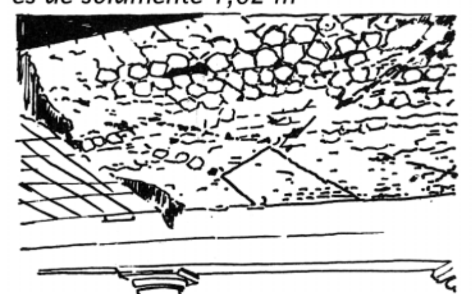


3. Bóveda en un edificio de oficinas moderno en Londres. Arquitectos: Mewis y Davis

2-2b. Bóveda plana del arquitecto Jules Hardouin en el ayuntamiento de Arles (1684). Con una luz de aproximadamente 13,60 m, la flecha es de solamente 1,62 m



4. Bóveda en un antiguo molino de alrededor de 1620 en Gronsveld (Limburg). Esta bóveda – construida en ladrillo – se parece a la de V. Louis (fig. 1)



5. Bóveda compuesta por vasijas en el Palais Royal de París. Arquitecto Victor Louis. Realizada en torno a 1760

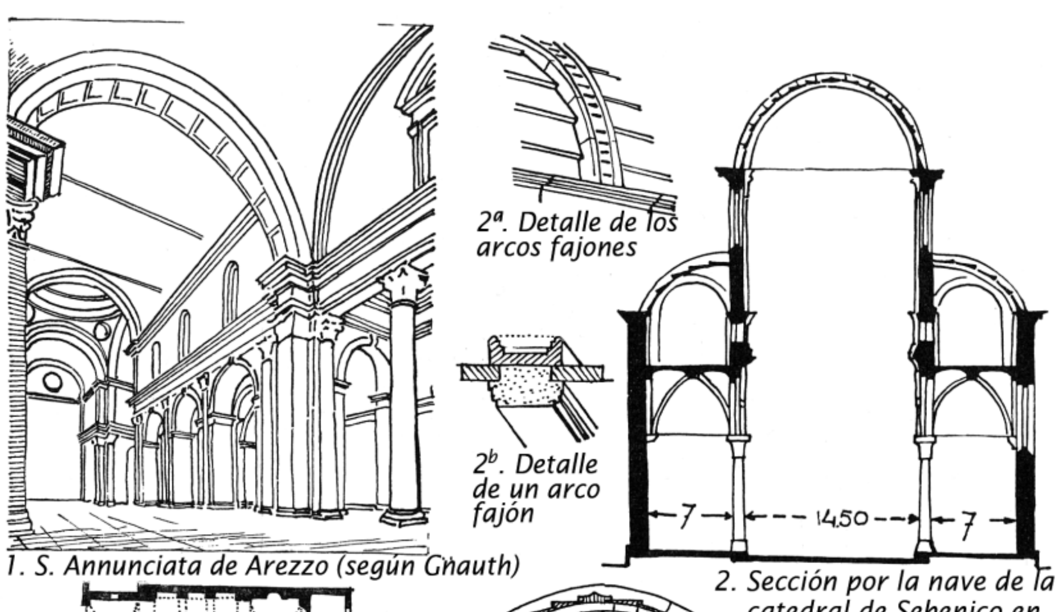
del yeso ya preparado lo que necesita para poner un ladrillo y no toca el resto de la pasta. Cantea con yeso dos lados del ladrillo y lo pone en su sitio presionando con la mano y con un golpecito de la paleta. Después un peón sostiene el ladrillo con una mano el tiempo suficiente hasta que se coloca el siguiente. Al colocarse el tercer ladrillo el primero ya está fijado con lo que se puede continuar el trabajo. Hilada tras hilada progresa hasta la clave que se coloca con especial cuidado.

Visto superficialmente se diría que no importa aquí cómo de gruesos son los ladrillos, ya que en España se usan incluso ladrillos de 30 × 15 × 2 cm, unidos unos contra otros por los cantos. Las denominadas rasillas, que aún en la actualidad tienen una amplia aplicación en el oficio de la construcción, tienen 26,5 × 12,5 × 3 cm y se toman con yeso, de fraguado rápido. Se tienden entre vigas de hierro y se forman bovedillas con ellas.

Estas bóvedas tabicadas españolas han encontrado en nuestro tiempo una nueva y amplia aplicación en América, donde Guastavino formó una sociedad que tiene la patente para la ejecución de bóvedas tabicadas de ladrillo en edificios públicos y cuyos métodos están basados en seculares tradiciones de Italia y España (Lám. 132). En estas bóvedas se hace excelente uso del hierro, que se coloca como tirante en los lugares críticos.

La aspiración por conseguir bóvedas ligeras fue la causa de que los arquitectos usaran ladrillos huecos y vasijas en la construcción. El arquitecto francés Victor Louis dio una notable solución en el Palais Royal de París (1760). Louis fue «Prix de Rome» en 1755 y en sus viajes por Italia su interés estuvo dirigido no sólo a las proporciones y formas del Renacimiento italiano sino también a las construcciones de los romanos, a su técnica y a sus procedimientos. Louis conoció entonces el método romano de introducir vasijas en las construcciones abovedadas. Sin embargo, él tenía que hacer un techo muy plano mientras que los romanos la mayoría de las veces realizaron superficies fuertemente abovedadas. Colocó bloques de piedra sobre las columnas en las que apoyaban las bóvedas estudiando con máximo cuidado su corte. Para neutralizar el empuje, el arquitecto dispuso un sistema de tirantes de hierro dentro y por encima de sus estructuras de piedra. Este sistema fue muy ingeniosamente concebido pero realmente no fue nada nuevo para la técnica francesa: Perrault ya lo había empleado con profusión en la columnata del Louvre.

LÁMINA 88. MÉTODOS DE ABOVEDADO ESPECIALES DEL RENACIMIENTO Y EL BARROCO



2ª. Detalle de los arcos fajones

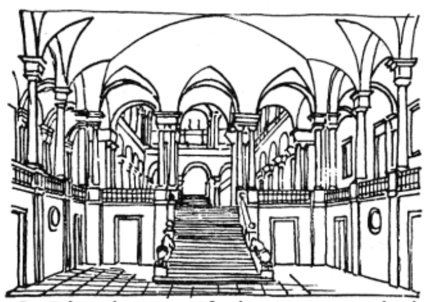
2ᵇ. Detalle de un arco fajón

1. S. Annunciata de Arezzo (según Gnauth)

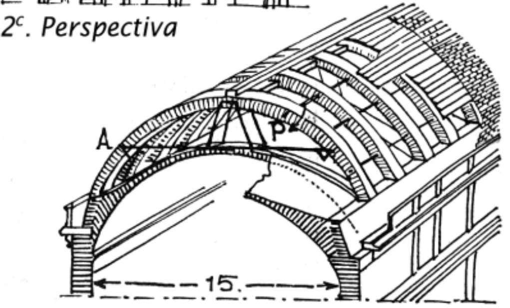
1ª. Planta
El empuje de la bóveda de cañón se absorbe mediante tirantes

2. Sección por la nave de la catedral de Sebenico en Dalmacia. La bóveda de cañón consta de grandes losas de piedra que apoyan en anchos arcos fajones. Un tirante absorbe el empuje (según Durm)

2ᶜ. Perspectiva



3. Bóveda esquifada: Universidad de Génova



5. Bóveda doble sobre una sala en el Palacio Ducal de Génova. Bóveda y arcos son de ladrillo. Esta construcción fue realizada en 1778 por el arq. S. Cantone. Quince arcos de aproximadamente 0,75 m de ancho y separados 1,40 m están unidos entre sí por placas de pizarra P; además cuatro de ellos están unidos por tirantes de acero A, que discurren planos sobre la bóveda esquifada. Un ulterior refuerzo se obtiene por el anclaje de algunos arcos con cruces de San Andrés de hierro y de los otros con placas de pizarra. La construcción de la cubierta se asemeja a la de la bóveda de Sebenico. (3, según Burckhardt; 5, según Durm)



4. Sección sobre una sala del Hospital de Génova (según Durm)

Cuando Gabriel en la mitad del siglo XVIII tuvo que restaurar esta columnata hizo un minucioso estudio del sistema de tirantes que le llamó poderosamente la atención. Respecto a la bóveda antes comentada, Louis consideró de la máxima importancia reducir su peso todo lo posible. Para ello, rellenó los paños con vasijas cilíndricas de terracota de 30 cm de longitud que, puestas de pie, se introdujeron en la pasta del mortero (Lám. 87, fig. 5).

Estos ejemplos pueden también servir de lección en construcciones modernas; tal como más adelante se indicará sobre las cúpulas, en los últimos decenios se han hecho distintas bóvedas basadas en estos antiguos procedimientos.

En su estudio sobre el Renacimiento italiano, Durm proporciona algunos dibujos que muestran la construcción de la bóveda de cañón de la catedral de Sebenico: pesados arcos fajones están unidos por losas de piedra de 75 cm de ancho (Lám. 88, figs. 2–2^{c}). El empuje de las bóvedas es absorbido por un eficaz sistema de tirantes.

Bóvedas formadas por dos cáscaras: El constructor de bóvedas se tuvo que enfrentar a menudo con problemas de gran dificultad. Las ventajas que ofrece una cubierta de fábrica comparadas con un techo de madera, sobre todo con respecto al riesgo de incendio, fueron las que llevaron a los constructores a hacer bóvedas. A veces las hicieron dobles con lo que la seguridad fue aún mayor.

Cuando el palacio ducal de Génova fue devastado en 1777 por un incendio, el arquitecto genovés Cantone recibió el encargo de su reconstrucción, con la expresa determinación de que no se usara madera en la construcción de la cubierta. Solucionó el encargo de forma interesante tendiendo una bóveda esquifada de ladrillo de 35 × 15 m sobre la sala, encima de la cual se dispusieron una serie de arcos que soportaban la cubierta. Esta última estaba compuesta de grandes placas de piedra sobre las que se colocaba el recubrimiento de la cubierta, consistente en pequeñas pizarras sentadas sobre mortero. Con placas de pizarra y tirantes de hierro cuidó de que existiera una sólida unión entre los citados arcos (Lám. 88, fig. 5).

Otro problema interesante se planteó en las salas del hospital de Génova. Se quería colocar un sistema de ventilación en la parte superior de la bóveda. Esta bóveda se compuso con dos cáscaras y el espacio existente entre ellas se puso en conexión con canales verticales y con aperturas en el muro exterior que se podían cerrar con trampillas (Lám. 88, fig. 4).

LÁMINA 89. CÚPULAS EN MILÁN Y EN VICOVARO

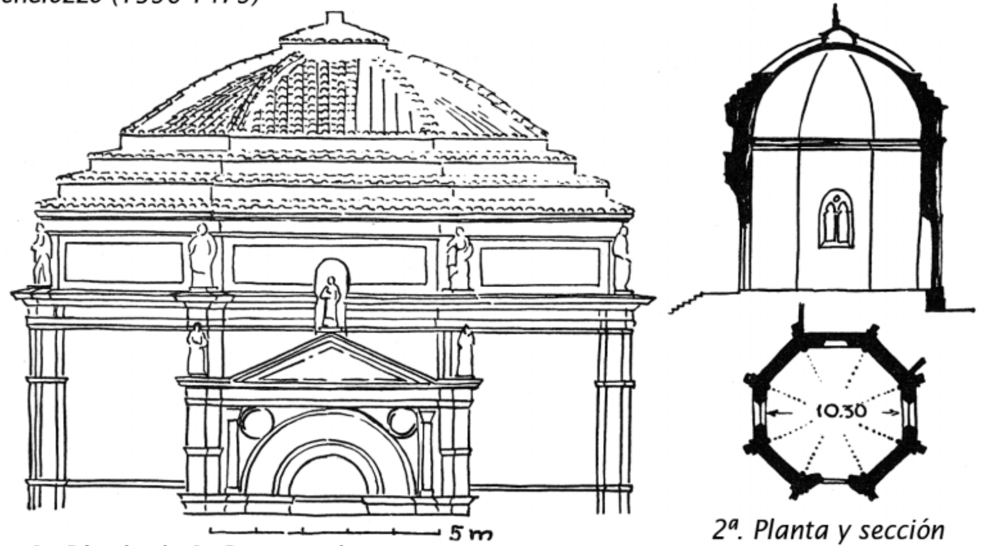
1ª. Planta

10m

1ᵇ. Sección por la cúpula

10 m

1. Cúpula de la capilla de S. Pietro Martire en S. Eustorgio de Milán. Esta es la construcción centralizada más temprana del Renacimiento en Milán, atribuida a Michelozzo (1396-1479)



2ª. Planta y sección

2. Cúpula de S. Giacomo de Vicovaro (según H.Strack)

En las cúpulas de grandes dimensiones, el empleo de cáscaras dobles e incluso triples fue casi la regla general.

Cúpulas

El ideal de la arquitectura del Renacimiento fue la planta centralizada, de forma que en la construcción de iglesias el centro de interés recayó en la construcción de cúpulas (Láms. 89–116).

En Italia tenían una antigua tradición; piénsese no sólo en las obras maestras de los romanos, sino que también en la Edad Media se había practicado la construcción de cúpulas. En el siglo XII se habían realizado, entre otras, importantes cúpulas sobre los baptisterios de Florencia, Cremona, Pisa y Parma (Lam. 99), que ya contenían todo tipo de disposiciones que serían perfeccionadas siglos más tarde por las grandes cúpulas del Renacimiento y del barroco. Las obras de los romanos sirvieron también como instructivo ejemplo; además, las construcciones de los bizantinos eran conocidas en Italia e incluso aplicadas en diferentes edificios, de manera que los maestros constructores que estaban instruidos en las naves góticas pudieron combinar sus propias experiencias y conocimientos con métodos de siglos de antigüedad.

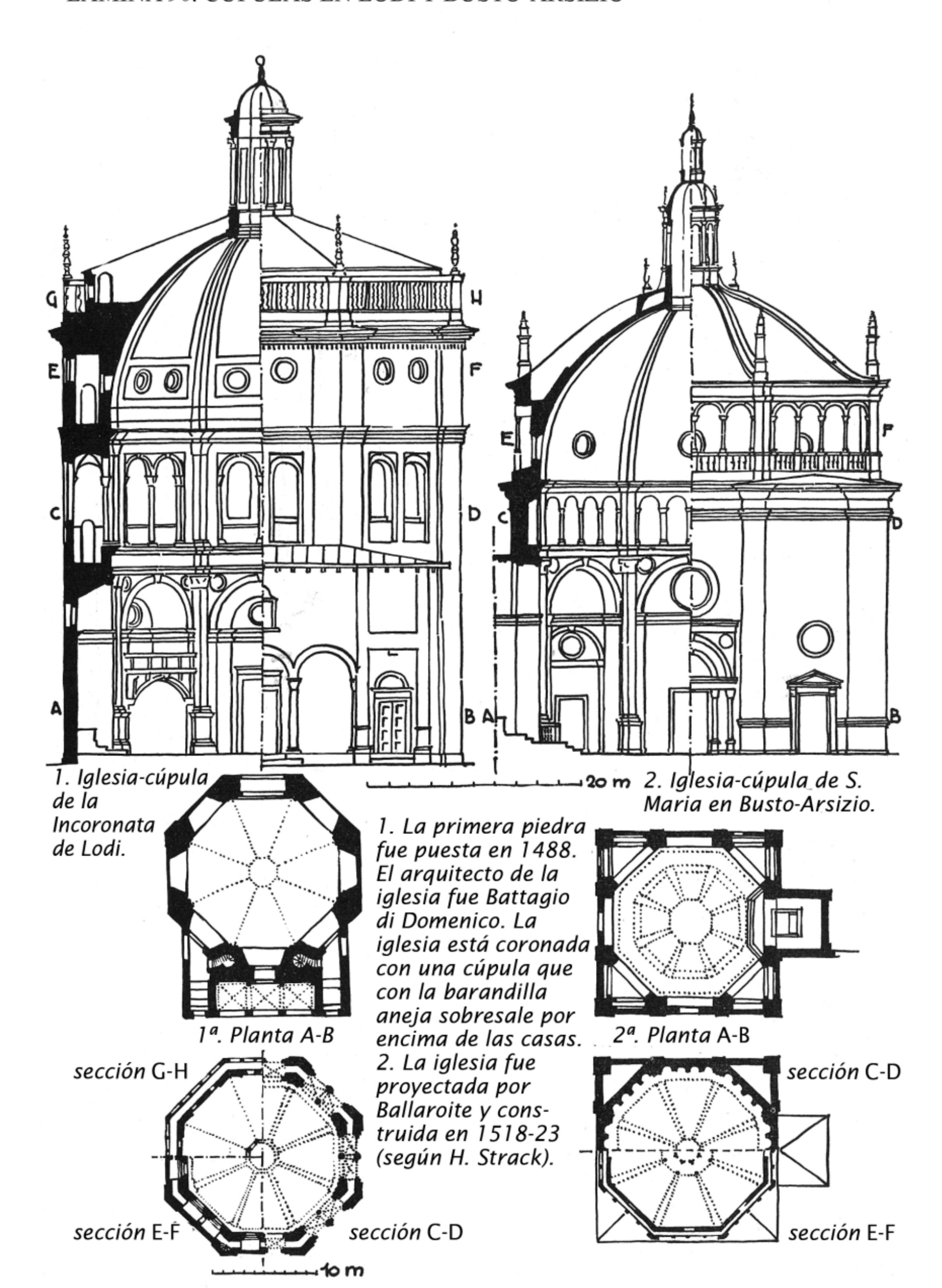
En la construcción abovedada del Renacimiento vemos, por tanto, cúpulas construidas a la manera bizantina, descansando sobre pechinas y con sección gallonada, pero también, cúpulas nervadas que recuerdan construcciones góticas, mientras que otras edificaciones revelan influencias más romano-occidentales en la manera en que se unen las construcciones de la cubierta y la cúpula.

La cúpula se eleva en el Renacimiento tanto sobre una planta circular o poligonal, como sobre una cuadrada.

El gran paso dado por el Renacimiento desde el punto de vista técnico fue la aplicación de la cúpula doble en las grandes construcciones o mejor dicho, de la cúpula de dos cáscaras en la que la cúpula exterior fue una buena protección contra el agua pero que también sirvió para resaltar la imagen exterior.

La mayoría de las veces por razones estéticas, la cúpula se coronó con una linterna. Mediante esta linterna, pequeña en relación al tamaño total de la cúpula, se hacía más evidente su grandiosidad; pero lo que también era importante, se

LÁMINA 90. CÚPULAS EN LODI Y BUSTO-ARSIZIO



1. Iglesia-cúpula de la Incoronata de Lodi.

2. Iglesia-cúpula de S. Maria en Busto-Arsizio.

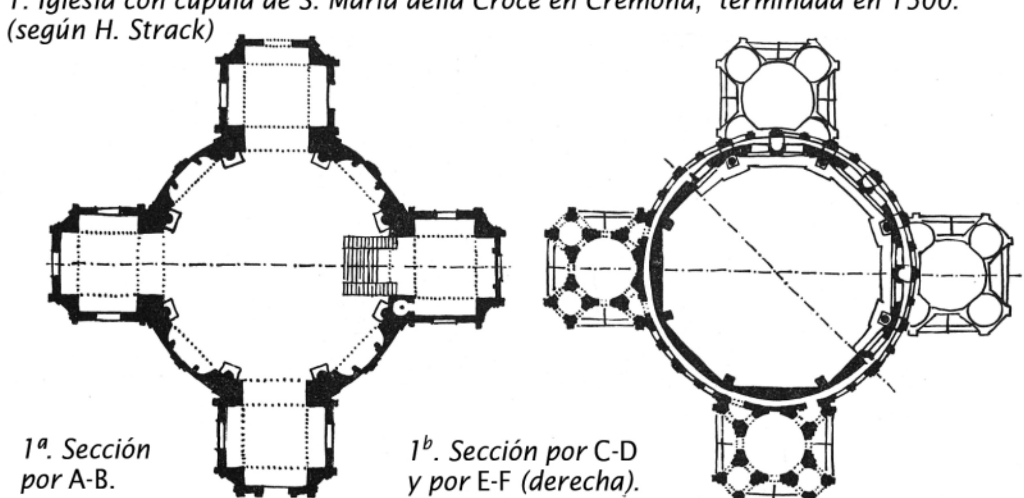
1. La primera piedra fue puesta en 1488. El arquitecto de la iglesia fue Battagio di Domenico. La iglesia está coronada con una cúpula que con la barandilla aneja sobresale por encima de las casas.
2. La iglesia fue proyectada por Ballaroite y construida en 1518-23 (según H. Strack).

LÁMINA 91. CÚPULA EN CREMONA

G H E F C D A B 10 m

1^{c}. Sección por G-H.

1. Iglesia con cúpula de S. María della Croce en Cremona; terminada en 1500. (según H. Strack)

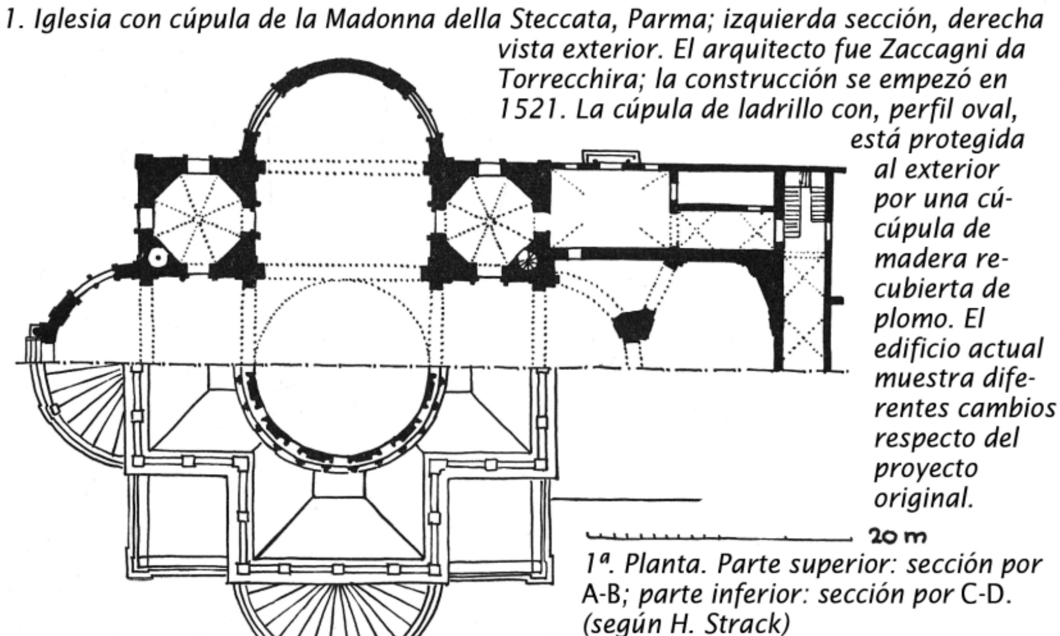


1^{a}. Sección por A-B.

1^{b}. Sección por C-D *y por* E-F *(derecha).*

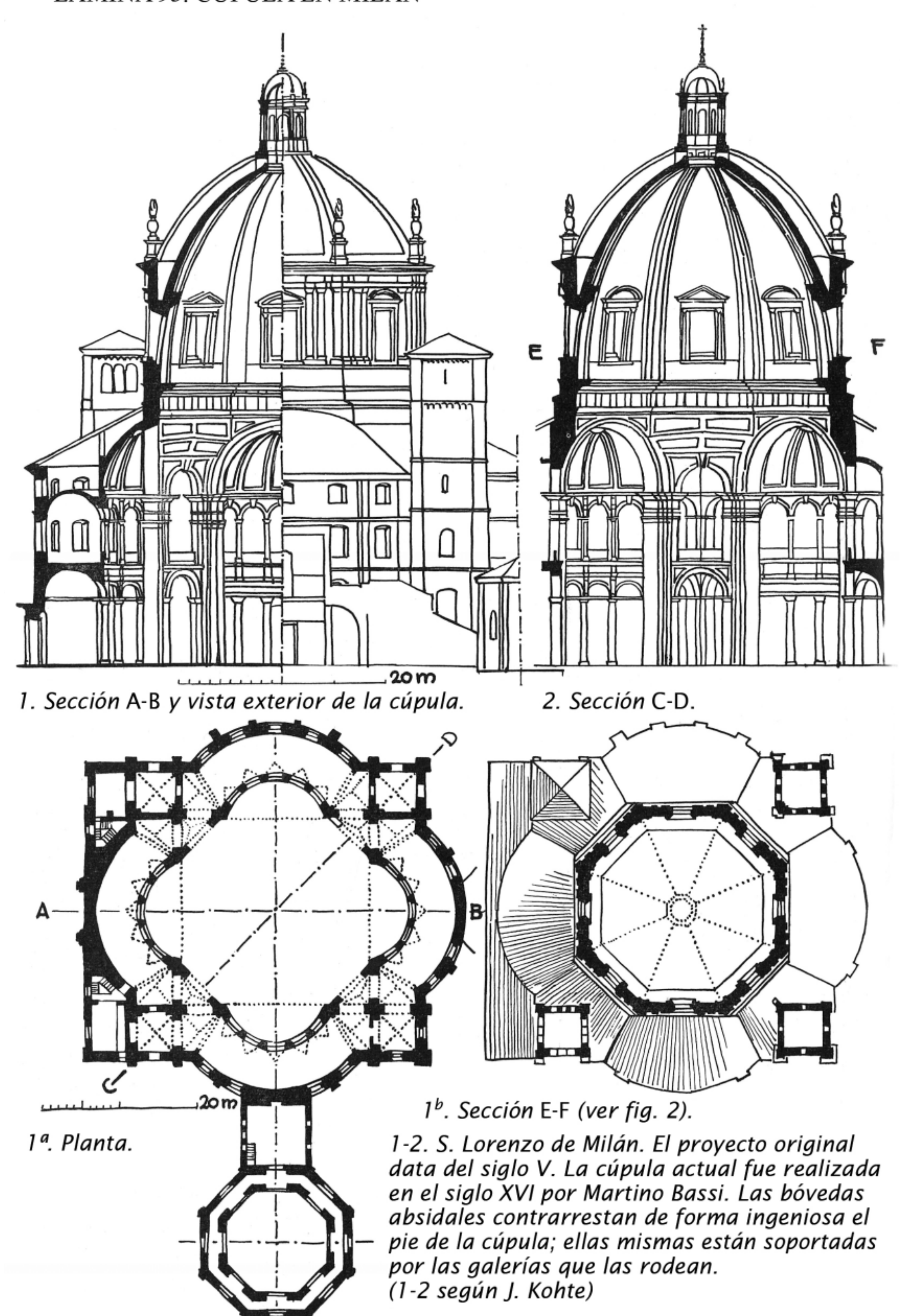
LÁMINA 92. CÚPULA EN PARMA

1. Iglesia con cúpula de la Madonna della Steccata, Parma; izquierda sección, derecha vista exterior. El arquitecto fue Zaccagni da Torrecchira; la construcción se empezó en 1521. La cúpula de ladrillo con, perfil oval, está protegida al exterior por una cú- cúpula de madera re- cubierta de plomo. El edificio actual muestra dife- rentes cambios respecto del proyecto original.



1ª. Planta. Parte superior: sección por A-B*; parte inferior: sección por* C-D. *(según H. Strack)*

LÁMINA 93. CÚPULA EN MILÁN



1. Sección A-B *y vista exterior de la cúpula.*

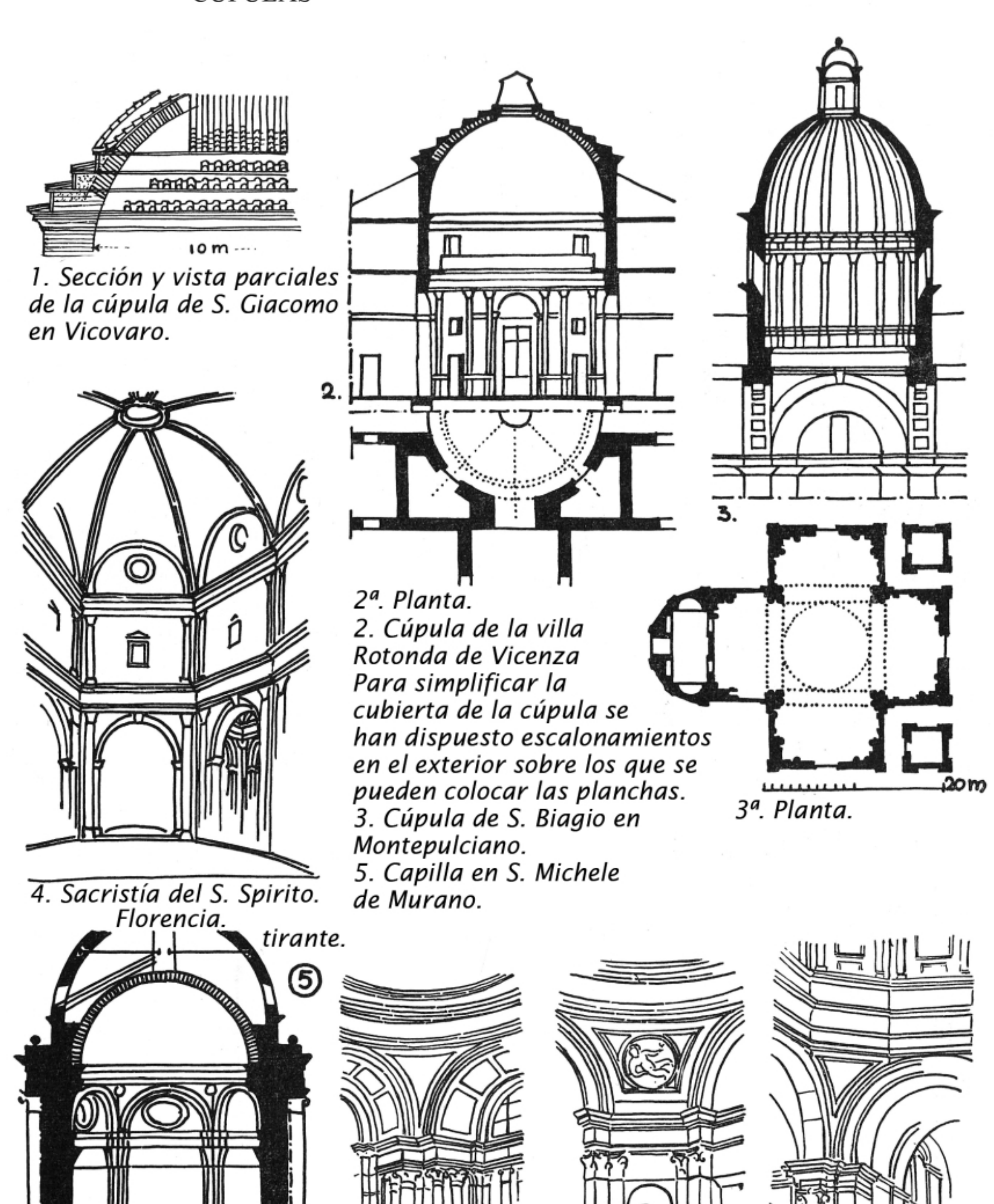
2. Sección C-D.

1ª. Planta.

1^b. Sección E-F *(ver fig. 2).*

1-2. S. Lorenzo de Milán. El proyecto original data del siglo V. La cúpula actual fue realizada en el siglo XVI por Martino Bassi. Las bóvedas absidales contrarrestan de forma ingeniosa el pie de la cúpula; ellas mismas están soportadas por las galerías que las rodean.
(1-2 según J. Kohte)

LÁMINA 94. SISTEMAS DE ABOVEDADO DEL RENACIMIENTO Y EL BARROCO. CÚPULAS



1. Sección y vista parciales de la cúpula de S. Giacomo en Vicovaro.

2ª. Planta.
2. Cúpula de la villa Rotonda de Vicenza Para simplificar la cubierta de la cúpula se han dispuesto escalonamientos en el exterior sobre los que se pueden colocar las planchas.
3. Cúpula de S. Biagio en Montepulciano.
5. Capilla en S. Michele de Murano.

3ª. Planta.

4. Sacristía del S. Spirito. Florencia.

5ª. Planta

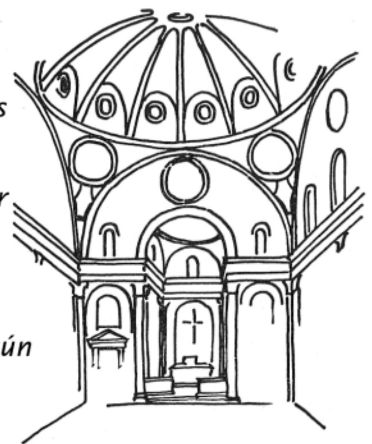
6. Pechina triangular (en cuña) en S. Maria del Popolo.
7. Pechina trapecial en la capilla Chigi.
8. Pechina triangular para una cúpula (octogonal) en S. Maria del Popolo; todas en Roma.
(1, 2, 2ª, 4, 5, 5ª, 6, 7, 8 según Durm; 3, 3ª, según Cassina)

LÁMINA 95. SISTEMAS ABOVEDADOS DEL RENACIMIENTO Y EL BARROCO. CÚPULAS

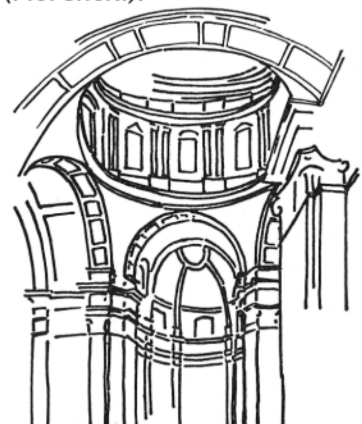


1. La cúpula rebajada esta apoyada por dos semicúpulas y por dos anchos arcos. El espesor de la cúpula es de medio pie en la coronación, y en la base de pie y medio (según G. Niemann).

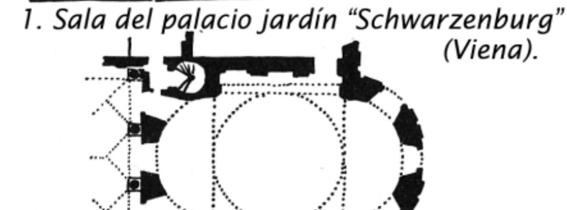
1. Sala del palacio jardín "Schwarzenburg" (Viena).



2. Sacristía de S. Lorenzo (Florencia).

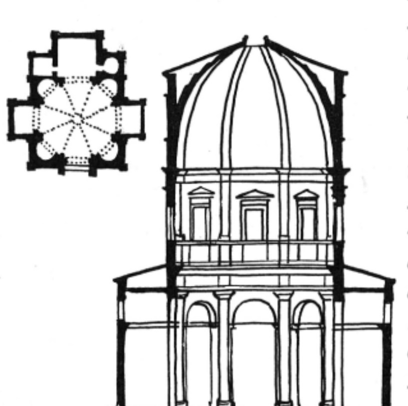


3. S. Andrea della Valle (Roma).

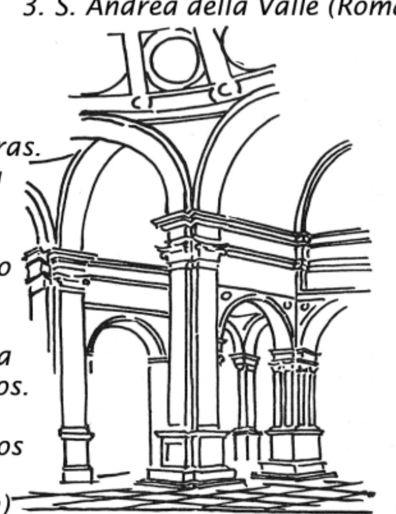


1ª. Planta.

2-5. En el Renacimiento y en el Barroco las cúpulas se levantaron de muy diversas maneras.
2. Cúpula gallonada sobre pechinas.
3. Cúpula con tambor descansando sobre pechinas.
4. Bóveda en rincón de claustro en forma de cúpula con nervios.
5. Cúpula con casetones decorativos sobre pechinas.
(2, 3, 5 según Durm)



4. St. Croce (de Riva) (según J. Burckhardt).



5. S. Giustina (Padua).

LÁMINA 96. CÚPULA EN SARONNO

A–

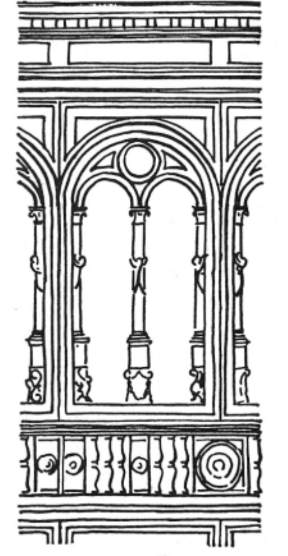
B

5m

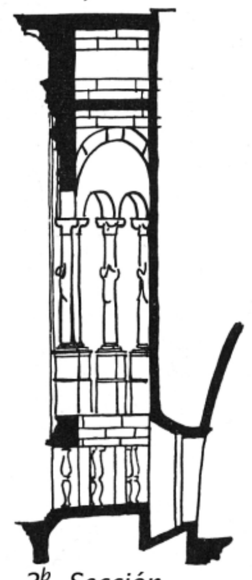
1ª. Planta.

10m

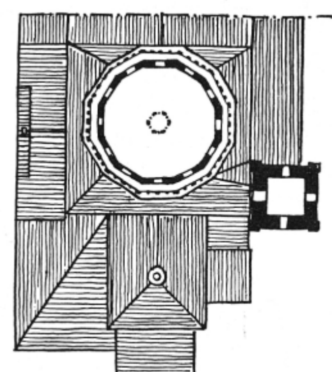
1. Sección de S. María en Saronno, con sección y alzado parcial de la cúpula.



2. Detalle de la galería.

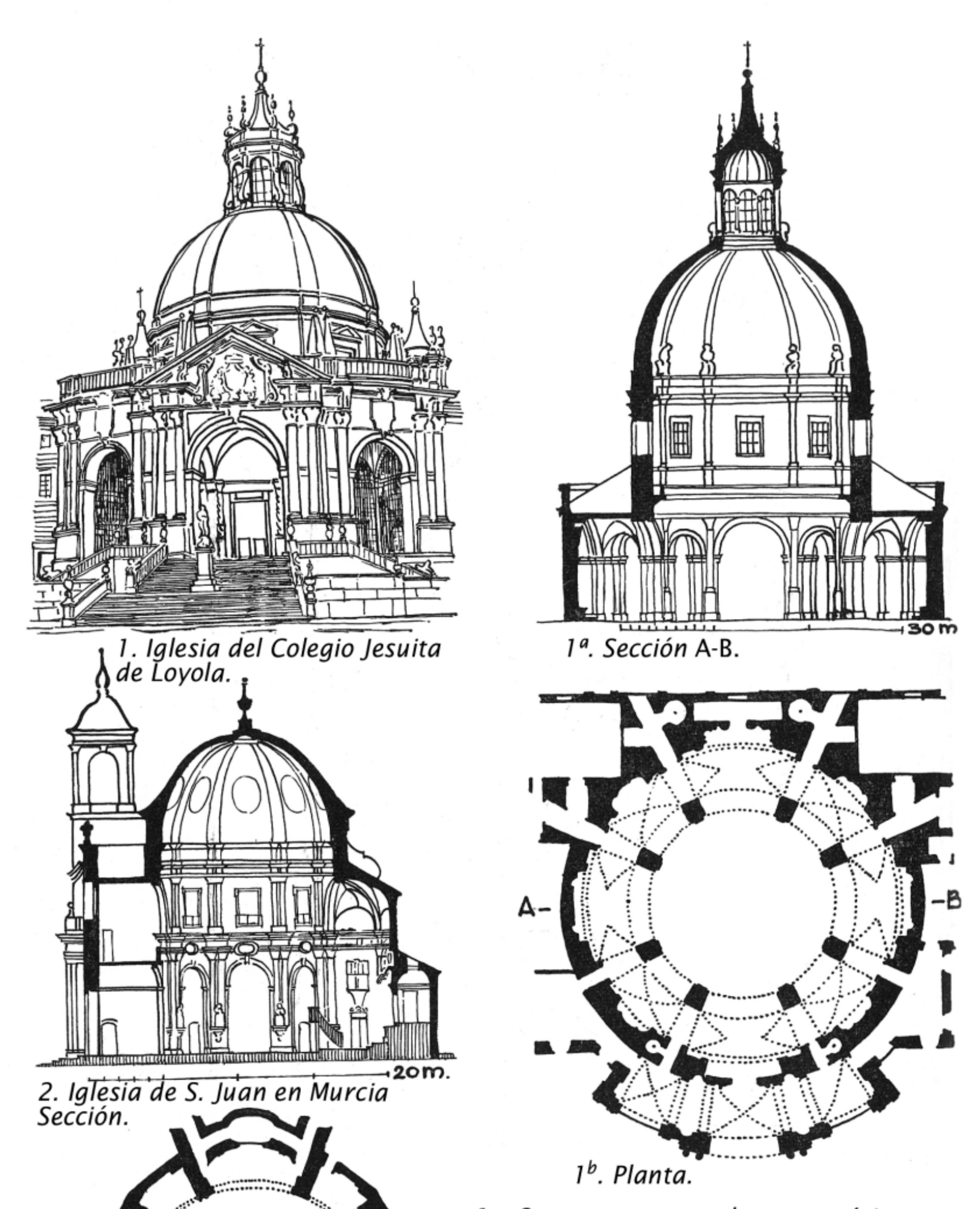


2^b. Sección.



1^b. Sección A-B (ver fig. 1)
La cúpula esta contrarrestada desde fuera por una galería de dimensiones extraordinariamente ligeras.
(1-2 según H. Strack)

LÁMINA 97. CÚPULAS EN LOYOLA Y MURCIA



1. Iglesia del Colegio Jesuita de Loyola.

1ª. Sección A-B.

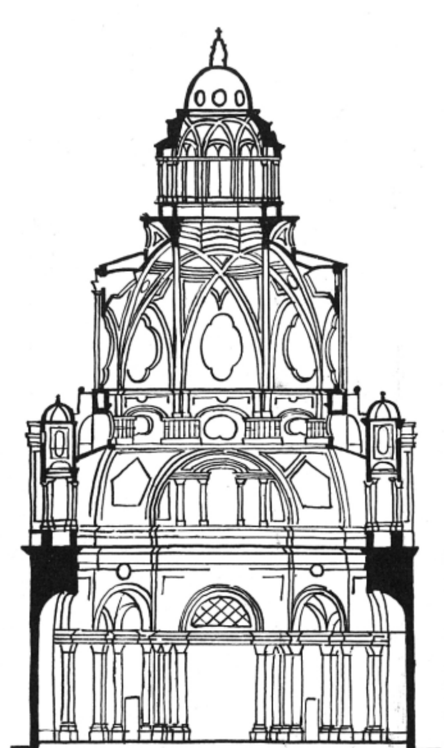
1ᵇ. Planta.

2. Iglesia de S. Juan en Murcia Sección.

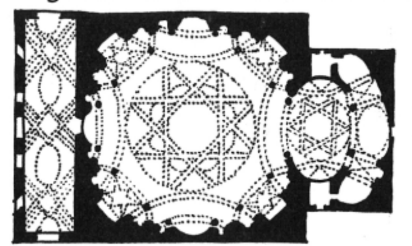
2ª. Planta.

1 y 2 son estructuras barrocas típicas españolas en las que la gran cúpula central descansa sobre ocho pilares situados a distancias desiguales entre sí. En la parte inferior de las cúpulas se colocaron fuertes zunchos de hierro. La cúpula oval está además estribada por una bóveda anular perimetral. (según O. Schubert)

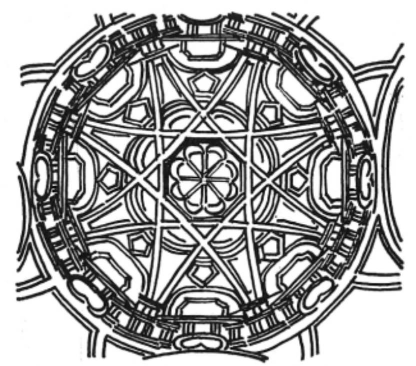
LÁMINA 98. CÚPULAS EN TURÍN, KAPPEL Y VICENZA



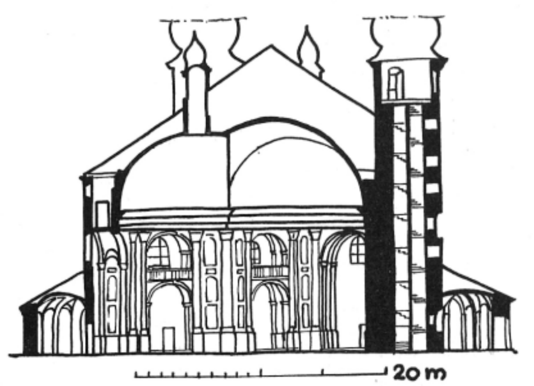
1. Iglesia de S. Lorenzo en Turín



1^a. Planta en la que se indica el sistema de nervios de la cúpula.



1^c. Vista del interior de la cúpula (1-1^c según Brinckmann).



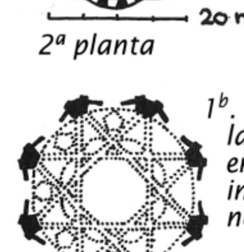
2. Iglesia de peregrinación en Kappel (Beieren). Tres cúpulas se cortan entre sí; son un símbolo de la Santísima Trinidad. Arquitecto George Dientzenhofer ca. 1688 (según Hauttmann).

20 m

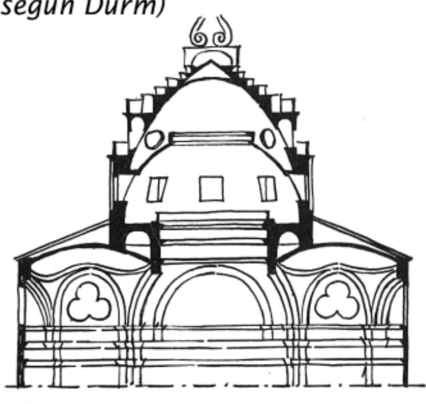
2ª planta

1. Esta notable cúpula fue diseñada en 1686 por Guarino Guarini. Este arquitecto fue un competente matemático que basó sus proyectos en construcciones geométricas. Estas bóvedas barrocas recuerdan a las bóvedas nervadas musulmanas y también a las góticas; evidentemente, el arquitecto anhelaba conseguir interesantes efectos espaciales. (1, 1^a, 1^b, según Durm)





1^b. Sección por la linterna en la que se indican los nervios.



3. Cúpula de S. Gaetano en Vicenza. Arquitecto Guarino Guarini (según Durm).

pudo crear una bella coronación, una elevación de la silueta y un armónico final de la cúpula.

La linterna tenía a veces un peso considerable, de forma que para soportarla eran precisas medidas extraordinarias; entonces, los nervios de la cúpula se hacían más gruesos o bien se añadía una cúpula intermedia de soporte.

En el barroco la composición de las cúpulas se hizo más complicada. Se llegó incluso a combinar entre sí hasta tres cúpulas de fábrica, de manera que el recubrimiento de cubierta se colocaba sobre el casco exterior, aunque también a veces la estructura de cubierta se hacía de madera.

Ya no se limitaron a plantas sencillas, sino que se trazaron también cúpulas sobre plantas ovales. A veces se ven formas de cúpulas que recuerdan bóvedas de cañón.

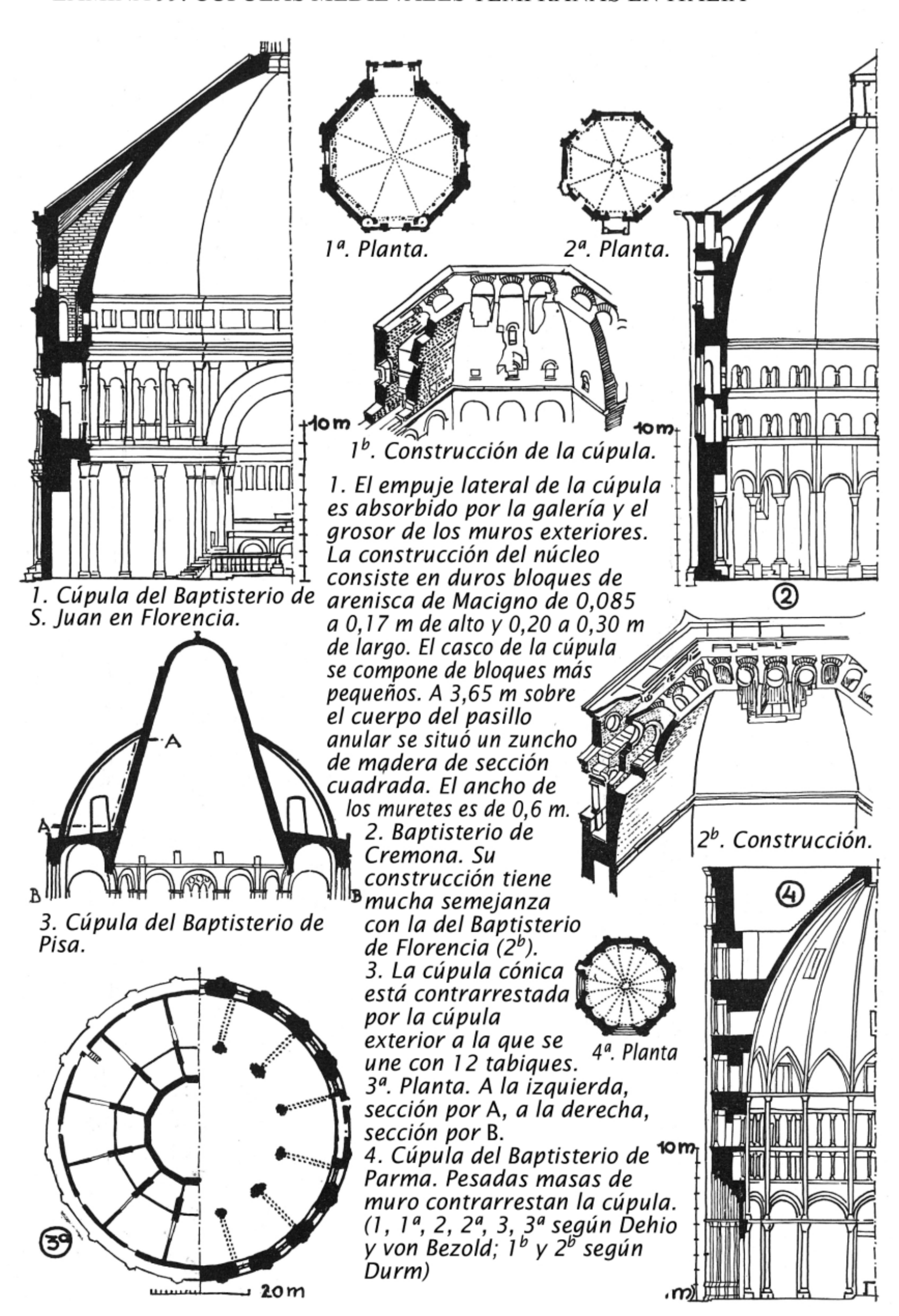
Las cúpulas del Renacimiento italiano no se deben ver como forman nuevas que surgen de repente. Por el contrario, se debe considerar que la tradición de la construcción de cúpulas en Italia había permanecido viva desde los romanos, y se había desarrollado posteriormente en el románico y el gótico, para finalmente celebrar sus más grandes triunfos en el Renacimiento y el barroco.

En el periodo románico sobre todo, se hicieron bellas cúpulas que inspiraron a los arquitectos de épocas posteriores. Algunas de ellas, las de los ya citados baptisterios, se estudiarán brevemente a continuación antes de la descripción de las cúpulas del Renacimiento.

Cúpulas medievales

La cúpula del baptisterio de Florencia ha dado motivo a un gran número de hipótesis. Durm la considera la primera, y el paso más importante, en el proceso de desarrollo de las grandes cúpulas de doble casco, de las que la cúpula de Brunelleschi en Florencia, S. Maria del Fiore, ca. 1420, y la cúpula de S. Pedro de Roma de Miguel Ángel, ca. 1540, forman el punto culminante. La cúpula del baptisterio tiene un perfil apuntado, con más de 14 m de flecha, y constituye una gigantesca bóveda claustral de ocho lados con una luz de 25,5 m (Lám. 99, fig. 1). Está rigidizada mediante dieciséis muros radiales entre ambos cascos; estos muros forman con sus abovedados (bóvedas de

LÁMINA 99. CÚPULAS MEDIEVALES TEMPRANAS EN ITALIA



1. Cúpula del Baptisterio de S. Juan en Florencia.

1ª. Planta.

2ª. Planta.

1ᵇ. Construcción de la cúpula.

2ᵇ. Construcción.

3. Cúpula del Baptisterio de Pisa.

4ª. Planta

1. El empuje lateral de la cúpula es absorbido por la galería y el grosor de los muros exteriores. La construcción del núcleo consiste en duros bloques de arenisca de Macigno de 0,085 a 0,17 m de alto y 0,20 a 0,30 m de largo. El casco de la cúpula se compone de bloques más pequeños. A 3,65 m sobre el cuerpo del pasillo anular se situó un zuncho de madera de sección cuadrada. El ancho de los muretes es de 0,6 m.
2. Baptisterio de Cremona. Su construcción tiene mucha semejanza con la del Baptisterio de Florencia (2ᵇ).
3. La cúpula cónica está contrarrestada por la cúpula exterior a la que se une con 12 tabiques.
3ª. Planta. A la izquierda, sección por A, a la derecha, sección por B.
4. Cúpula del Baptisterio de Parma. Pesadas masas de muro contrarrestan la cúpula.
(1, 1ª, 2, 2ª, 3, 3ª según Dehio y von Bezold; 1ᵇ y 2ᵇ según Durm)

cañón inclinadas) la cubierta exterior, y unen la cúpula con el muro envolvente en un cuerpo único. Por fuera el tejado está cubierto con placas de mármol. Sobre las esquinas de la estructura están colocados contrafuertes de 3,70 m de grosor, y los muros tienen una sección de 1,75 m, con nichos, como en el Panteón de Roma. También en la solución de la cubierta presenta el baptisterio de Florencia semejanzas con el Panteón. Esta importante cúpula data de la primera mitad del siglo XII.

El baptisterio de Cremona, de 1167, tiene alguna analogía con la construcción anterior. Bajo la cúpula, se han colocado galerías en el interior del espesor de la masa del muro haciéndolo más ligero (Lám. 99, fig. 2).

El baptisterio de Pisa exhibe una cúpula cónica, precursora de la estructura que Wren siglos más tarde aplicaría en S. Pablo de Londres (Lám. 99, fig. 3). Diotisalvi construyó esta notable estructura hacia 1153; la cúpula exterior data quizás del siglo XV.

La cúpula del baptisterio de Parma también procede del siglo XII, construyéndose hacia el final del siglo (Lám. 99, fig. 4). Desde fuera es un octógono, desde dentro es sin embargo de dieciséis lados. Su construcción es mucho más gótica que las de las cúpulas antes citadas.

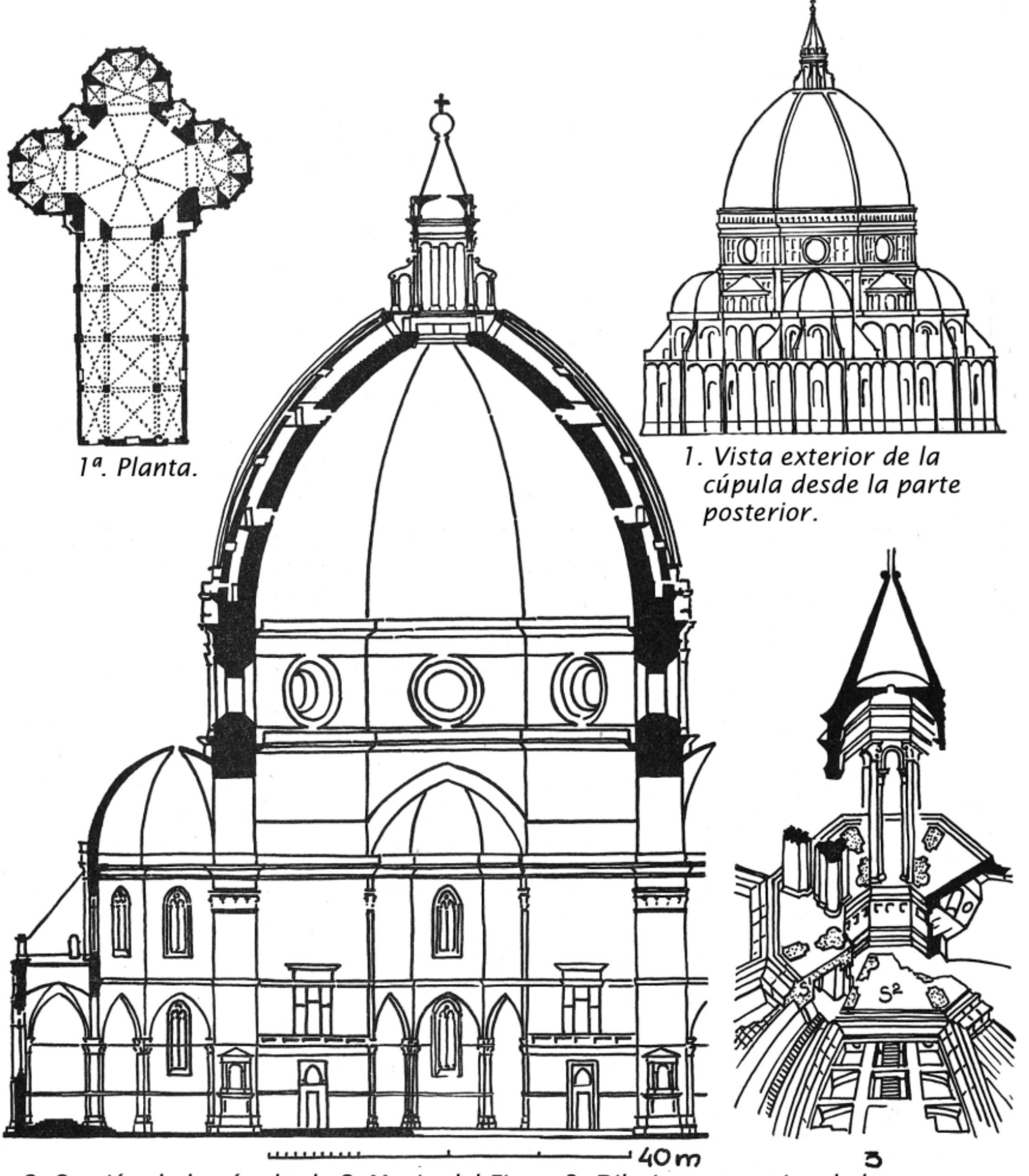
Es muy difícil y no tiene, a efectos de la compresión de la técnica, mucha utilidad, tratar de una forma sistemática las muchas variaciones que muestra la construcción de cúpulas renacentistas y barrocas. La construcción, en este periodo estilístico, descansa en el genio de unos pocos, en las características individuales de los maestros constructores. En lo que sigue, sólo se tratarán las características y problemas constructivos.

La cúpula de S. Maria del Fiore de Florencia

Diferentes estudios han sido dedicados a esta gran construcción. Entre los principales (de la última época) están las ediciones de las actas sobre la construcción de la cúpula a cargo de Cesare Guasti en 1857, seguidas de las publicadas en 1880 por Camilló Boito sobre la construcción de la nave.

Casi todos los historiadores que han tratado el Renacimiento italiano han dado su opinión sobre ella. Pueden citarse entre ellos a J. Rondelet, A. Nardini y J. Durm porque han dado indicaciones sobre cuestiones técnicas. Pero todas las

LÁMINA 100. CONSTRUCCIÓN DE LA CÚPULA DE S. MARIA DEL FIORE EN FLORENCIA



1ª. Planta.

1. Vista exterior de la cúpula desde la parte posterior.

2. Sección de la cúpula de S. Maria del Fiore. 3. Dibujo perspectivo de la construcción de la linterna. Es visible la manera en que los nervios están unidos por arcos y además cómo los nervios están unidos en la coronación de la cúpula mediante pesadas losas de piedra (S¹, S²).

4. Paso a través de los gruesos nervios de esquina de la cúpula. Se puede acceder a todas las partes de la cúpula gracias a una escalera situada entre las dos cáscaras.

(1, 1ª, 2 según Dehio y von Bezold; 3, 4 según Durm)

4.

cuestiones candentes que sobre esta cúpula se han planteado en torno a la participación y autoría de los distintos maestros no han sido ni mucho menos solucionadas.

En 1288 el arquitecto florentino Arnolfo comenzó la construcción de la iglesia, no pudiendo llevar a cabo su plan de construir en el centro una gran cúpula. Los planes para su construcción fueron de nuevo considerados a comienzos del siglo XIV. Según Durm, los muros existentes eran suficientemente sólidos y resistentes como para soportar la pesada cúpula sin ulteriores precauciones. No profundizaremos sobre las cuestiones concernientes a la autoría de las construcciones de la cúpula; en cualquier caso, es claro que en 1419 Brunelleschi hizo un modelo en colaboración con otros maestros en el que mostraba la forma en que una parte considerable de la cúpula se podía ejecutar sin hacer uso de pesadas cimbras de madera. Planteó hacer una cúpula de doble cáscara de manera que se consiguiera una buena protección contra el agua y se realzase el aspecto exterior. Además, el espacio hueco intermedio podía albergar escaleras, necesarias para poder acceder a todas las partes, de manera que la cúpula se pudiera inspeccionar fácilmente.

En 1420 se comenzó la obra y dieciséis años más tarde se pudo cerrar la cúpula. Durante este importante periodo de trabajo Brunelleschi dio nuevas indicaciones para la construcción, que modificaban las iniciales de 1420. Realmente la construcción le obligó a una constante profundización en su estudio, aunque ya en las primeras condiciones había considerado los diferentes problemas que aparecerían en su ejecución. Con toda probabilidad le sirvió como ejemplo la cúpula del baptisterio de Florencia, que también tenía un doble casco y cuya construcción muestra gran semejanza con la de S. Maria del Fiore. Quizás se pueda señalar también la del baptisterio de Cremona, una interesante construcción del siglo XII pero que en el aspecto técnico es inferior al, más grande, baptisterio de Florencia (Lám. 99, figs. 1, 2).

Brunelleschi ideó una cúpula nervada con una luz de 41,97 m. Sobre las ocho esquinas se colocaron nervios de 3,50 m de ancho en la base, disminuyendo hacia arriba hasta 0,75 m. En cada paño hay, además, una pareja de gruesos nervios de refuerzo de 1,75 m de ancho en el arranque que se adelgazan también hacia arriba (Lám. 101). Los paños de bóveda situados sobre dichos nervios se cons-

truyeron hasta una altura de 2,50 m por hiladas horizontales, abarcando todo el espesor que alcanzó los 5,40 m; después, las cúpulas se elevaron independientes. La cúpula interior presenta tres espesores diferentes: abajo 2,42 m, la parte intermedia 2,21 m y la parte superior 2,1 m. La cúpula exterior es de 0,60 m de espesor. Entre ambas cúpulas hay un espacio de 1,50 m.

La cúpula exterior está unida a los nervios principales mediante nueve arcos planos situados en posición radial. Estos arcos discurren a través de los nervios intermedios, con su trasdós tocando la superficie exterior de la cúpula. ¿Cuál es el sentido de dichos arcos? ¿Sirven, como muchos autores afirman, para impedir el quiebro de los paños de la bóveda? Durm lo pone en duda, según nuestra opinión acertadamente, puesto que si tuvieran esa función también serían necesarios para el paño intermedio de la bóveda, y este no tiene ningún refuerzo. Sin embargo son útiles e imprescindibles. La cúpula apoya sobre todo en los ocho nervios principales; donde se concentran los mayores esfuerzos. Pero es primordial que haya una transición uniforme entre los nervios fuertemente cargados y los paños de bóveda unidos a ellos. La enorme diferencia de sección de los nervios y los paños se reduce mediante la colocación de los arcos, y las transiciones se efectúan también de forma más uniforme, con lo que el riesgo de rotura se hace menor. Además, de esta manera, también una parte de los paños contribuye a reducir el peso de las masas de fábrica transmitido a los nervios de las esquinas.

Respecto a los nervios intermedios, no había motivos para hacer una transición repartida como en los nervios de esquina. Se puso excepcional cuidado en hacer éstos últimos de gran solidez. Brunelleschi mando cocer ladrillos aplantillados con pesos de 12 a 15 kg mientras que los rectangulares y normales pesaban entre 5 y 7 kg. Estos ladrillos en forma de L se unieron en las esquinas con los ladrillos normales con un aparejo de espina pez (Lám. 101, fig. 2).

El riesgo de una rotura hacia dentro está presente, pero con las dimensiones de la cúpula interior, es muy improbable. Se puede suponer que hasta una altura de aproximadamente 18 m sobre el arranque la cúpula se pudo ejecutar sin cimbra, no existiendo hasta dicha altura ningún peligro de rotura. El ancho del paño entre los nervios interiores tiene como máximo 3 m, mientras que la pendiente en relación al eje de la bóveda, la curvatura hacia el interior, es escasa. Más arri-

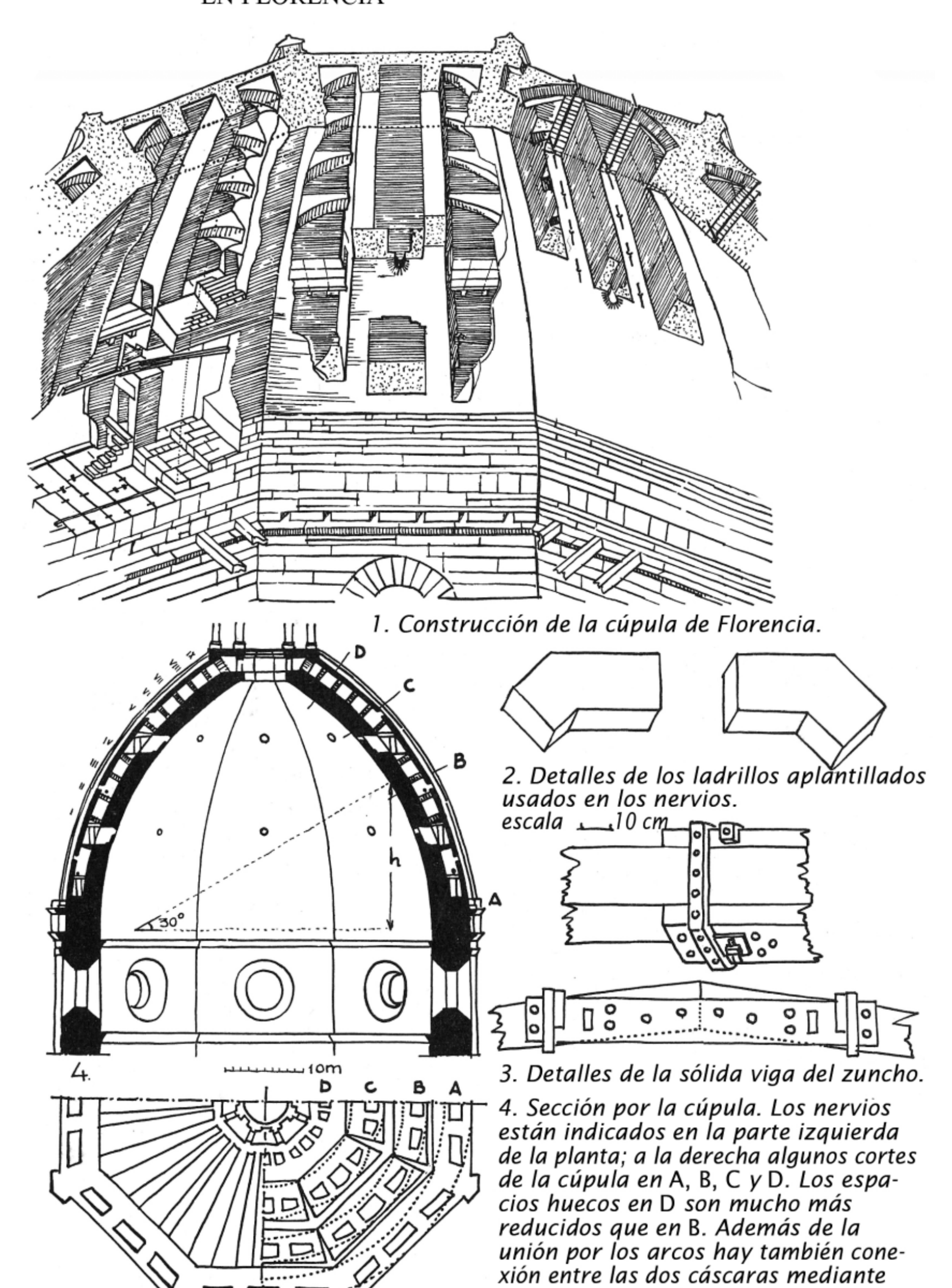
ba la inclinación se hace mayor, pero el paño es cada vez más pequeño. Con estas medidas se puede mantener un paño inclinado sin peligro de fractura. Además, las cúpulas interior y exterior se unieron entre sí, tal como se verá más adelante.

Una cuestión que ha sido muy debatida es en qué medida se pudo levantar esta cúpula sin hacer uso de cimbras. El profesor Mäkelt (1942) opina que esto fue posible hasta una altura *h* que se podía determinar trazando una línea desde el centro del arco con un ángulo de unos 30º con el plano horizontal. Por encima de ella es necesaria una cimbra al igual que al hacer una bóveda de cañón (Lam. 101, fig. 4). (Se supone que los perfiles de la cúpula son arcos de circunferencia, lo que es discutible.) Considerando que los nervios se erigieron a la vez que los paños, se deduce que, si se excluye el empleo de pesadas cimbras, se formó cada vez un anillo de fábrica que sin embargo necesitaría una cimbra de apoyo hasta que el anillo se cerrara; después, el anillo se mantendría por sí mismo en equilibrio.

Se puede considerar esta cúpula como un conjunto de arcos apuntados con tendencia a elevarse hacia arriba en la parte superior. En cuanto se coloca la linterna, ésta ejerce por su peso suficiente presión para neutralizar dicha tendencia. Sin embargo, durante los años que duró la construcción este peso no estuvo presente y fue entonces necesaria una sujeción, aunque no obstante pudo ser bastante ligera.

El célebre arquitecto tomó diversas medidas para hacer su construcción lo más sólida posible. El arranque se hizo con bloques macizos de piedra de Macigno sólidamente unidos con grapas de hierro; cinco metros por encima se encuentra un zuncho de 24 vigas de castaño de 35 cm de altura y 30 cm de ancho enlazadas en los ángulos con una unión formada por tablones de roble de 12 cm de grueso unidos con espigas, reforzada con pletinas de hierro de $6 \times 0{,}8$ cm de sección (Lám. 101, fig. 3). En el siglo XVII Gherardo Silvani reforzó dicho zuncho, y en 1825 Gaetano Baccani lo reforzó por segunda vez. Hubo una polémica sobre la eficacia de dicho anillo, pero el maestro, se apoyó aquí en los ejemplos de los grandes constructores. En cualquier caso, el anillo tuvo sentido durante el largo periodo de fraguado del mortero. Por encima de él se colocaron además algunos otros zunchos; su número incluso se incrementó con uno o dos zunchos añadidos hacia 1696, cuando se descubrieron grietas en la cúpula y el tambor.

LÁMINA 101. CONSTRUCCIÓN DE LA CÚPULA DE S. MARIA DEL FIORE EN FLORENCIA



1. Construcción de la cúpula de Florencia.

2. Detalles de los ladrillos aplantillados usados en los nervios.
escala 10 cm

3. Detalles de la sólida viga del zuncho.

4. Sección por la cúpula. Los nervios están indicados en la parte izquierda de la planta; a la derecha algunos cortes de la cúpula en A, B, C *y* D. *Los espacios huecos en* D *son mucho más reducidos que en* B. *Además de la unión por los arcos hay también conexión entre las dos cáscaras mediante sólidos bloques de piedra.*
(1-4 según Durm)

4ª. Planta.

Brunelleschi tomó la precaución de unir los dos cascos entre sí mediante gruesos perpiaños de piedra de Macigno de 43 × 38 cm de sección, colocados a dos alturas diferentes. La primera serie consta de 24 × 3 perpiaños, la más alta de 24 × 2 piedras. Los perpiaños atraviesan todo el espesor de la cúpula exterior y penetran profundamente en la interior.

Los pasillos por donde discurren las escaleras en el espacio entre ambas cúpulas, proporcionan un atado extra de forma que, a pesar de atravesar los nervios, constituyen un refuerzo. En la elección del material vemos también la intención de hacer la parte inferior de la cúpula más pesada que la superior, ya que hasta los 18 m sobre el arranque está construida con piedra arenisca y por encima con ladrillo. Pero puesto que en la parte superior hay menos espacio hueco, la masa en esta zona es incluso superior a la de la base.

Durm opina, con razón, que el constructor habría hecho aún mejor adelgazando algo hacia arriba el espesor de la cúpula, tal como ocurre en la de S. Pedro de Roma. Es verdad que el espesor del casco interior en la parte de abajo es algo mayor que en la coronación, pero esta diferencia es demasiado pequeña como para mejorar la estabilidad de la cúpula.

A pesar del gran cuidado puesto en esta construcción las grietas no se hicieron esperar. Alessandro Cecchini las atribuyó a asientos causados por la cimentación. Dijo además que no existen grandes cúpulas sin grietas cuando están levantadas sobre pilares independientes unidos por arcos torales de fábrica.

Rondelet, hacia 1780, inició una investigación sobre las roturas que se habían constatado en 1694. En esa época se introdujeron llaves de bronce y mármol en las grietas y, desde entonces, las grietas no aumentaron. Atribuyó las grietas al efecto de los cambios de temperatura y al uso de materiales heterogéneos, sobre todo en el tambor donde la fábrica estaba formada por ladrillos y argamasa recubierta de travertino. No obstante, este gran monumento ha desafiado el paso de los siglos a pesar de los terremotos y haber sido sacudido por rayos en repetidas ocasiones. Permanece como una sorprendente demostración del genio de los grandes maestros constructores del Renacimiento.

La cúpula de S. Pedro de Roma

La construcción de la cúpula de S. Pedro de Roma significó la consecución de un ideal al que linajes de geniales constructores había aspirado. En el año 1506 el arquitecto papal Bramante puso la primera piedra. Durante ocho años dirigió el progreso de los trabajos. A su muerte estaban terminados los grandes arcos torales que debían soportar la cúpula tal como deja ver un dibujo de ca. 1533 del holandés Heemskerk. Después siguió un periodo de inactividad en la obra, pero no en la realización de proyectos para la terminación del monumento. Los más grandes arquitectos del Renacimiento, entre otros, Sangallo, Rafael y Miguel Ángel, trabajaron en él consecutivamente; los planes del último maestro citado serían los realizados. Dejó un modelo de la cúpula de 5,40 m de altura y 3,86 m de ancho, en el que todos los detalles, incluso los zunchos, estaban reflejados con gran precisión, y puesto que el modelo se ha conservado, nos ha podido ilustrar sobre sus particularidades constructivas. El primer arquitecto, Bramante, fue un maestro constructor de talento, nacido en Urbino; aprendió el arte de la construcción de bóvedas en el norte de Italia, y puede tomarse como ejemplo típico de arquitecto del Renacimiento. Su obra destaca por la pureza de proporciones y por una meditada armonía entre todas las partes.

El segundo arquitecto, Miguel Ángel, fue escultor, pintor, constructor de fortificaciones, etc., un genio universal que, también en el campo de la arquitectura, supo acometer los más grandes encargos. Pero carecía de la formación de Bramante, con su extraordinaria sensibilidad para las proporciones en arquitectura. Miguel Ángel veía en todo grandiosidad y buscó los efectos más extraordinarios. La pureza de las proporciones fue sacrificada, cuando fue preciso, al anhelo por las composiciones formidables. En estos dos maestros constructores, y en un mismo edificio, se siguieron consecutivamente dos ideas de estilo: el Renacimiento y el barroco.

A la muerte de Miguel Ángel en 1564 estaba terminado el tambor; la dirección posterior recayó en Giacomo della Porta y en Fontana, siendo este último quien finalizó la linterna en 1592.

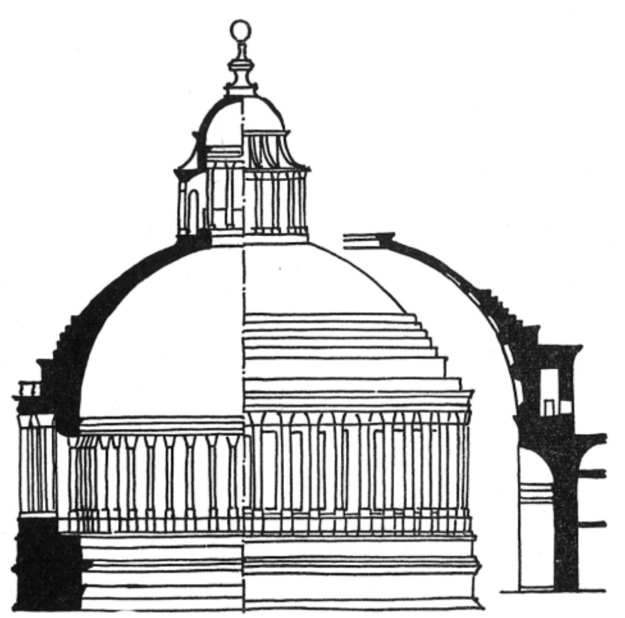
El emplazamiento: En el lugar donde la colina Áurea y la colina Vaticana forman un valle estuvo situado antaño el circo de Cayo y Nerón (Lám. 103, figs. 5–8).

Siglos más tarde se construyó sobre los restos de este circo romano la antigua basílica de San Pedro, que incluía cierto número de construcciones anexas. El problema ante el que se enfrentó Bramante fue, ni más ni menos, que la demolición de la antigua basílica con sus anexos y la creación de una enorme construcción sobre un suelo que, en partes había estado cargado durante siglos con un considerable peso, mientras que en otras partes había permanecido inalterado. A pesar de las precauciones que tomó (hizo poner una cimentación de pilotes bajo los pilares que no descansaban sobre los antiguos cimientos, Lám. 103, fig. 8), ya durante la construcción de los pilares se produjeron asientos diferenciales que provocaron grietas en los pilares.

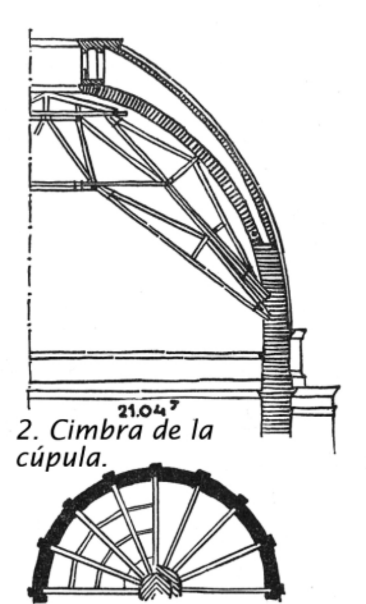
La afirmación de Vasari de que los pilares se reforzaron más tarde, afirmación que gran número de escritores sin mayor sentido crítico ha suscrito, ha sido impugnada por Durm de forma incontestable. Un refuerzo habría conllevado un ensanchamiento de los cimientos siendo muy dudoso que tal ensanchamiento hubiera podido tener algún efecto útil. La causa de las grietas fueron los asientos desiguales en el terreno. Estos no se pueden eliminar ni hincando después una serie de pilotes, ni haciendo más anchos los pilares. La conclusión de Durm de que dicho refuerzo se limitó a la colocación de algunos sólidos zunchos de hierro en las partes afectadas por las grietas ha tenido gran aceptación. Los trabajos se reanudaron después de más de cuarenta años de inactividad; para entonces los pilares habían asentado por completo. La carga del suelo no era demasiado grande, según Durm. El ingeniero francés Durand-Claye llegó, después de precisos cálculos, a la misma conclusión. (El peso de la cúpula con tambor y pilares torales fue calculado por Poleni en 1748, dando un valor de 55.220.700 kg.)

LOS PILARES: Se conocen diferentes proyectos a nombre de Bramante y da Sangallo en los que la sección de los pilares difiere de la del proyecto realizado (Lám. 103). Sin embargo se puede admitir como un hecho que los pilares en su forma actual son atribuibles a Bramante; lo que se dijo para la cimentación es válido también ahora, es decir, que es casi imposible regruesar un pilar sin correr el riesgo de que se originen tensiones desiguales y por tanto asientos. La fábrica nueva que se colocara tendría todavía que fraguar y retraerse mientras que la fábrica antigua ya estaba asentada. Es sabido, por cierto, que los pilares

LÁMINA 102. PROYECTO DE BRAMANTE PARA LA CÚPULA DE S. PEDRO DE ROMA

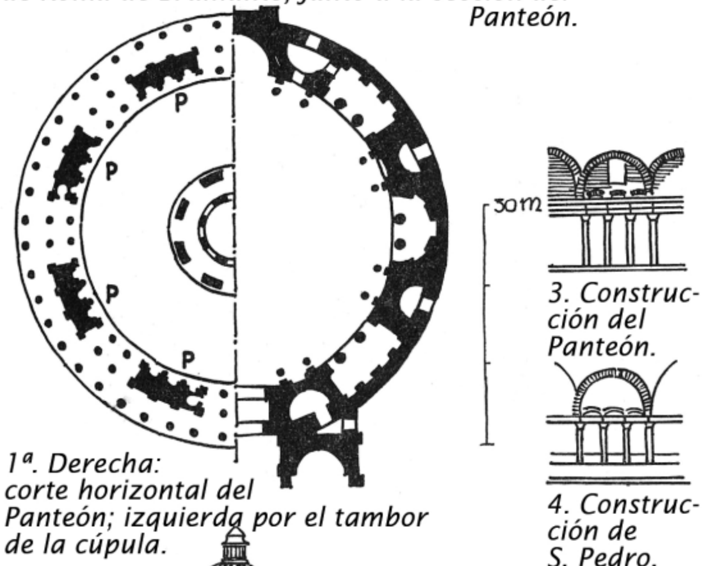


1. Proyecto de la cúpula de la iglesia de S. Pedro de Roma de Bramante, junto a la sección del Panteón.



2. Cimbra de la cúpula.

2ª. Planta. (según Durm)



1ª. Derecha: corte horizontal del Panteón; izquierda por el tambor de la cúpula.

3. Construcción del Panteón.

4. Construcción de S. Pedro.

5. Fachada delantera de la iglesia de S. Pedro.

1. El proyecto de cúpula de Bramante muestra evidente parecido con el Panteón de Roma. La luz es aproximadamente la misma, en torno a los 42 m. Bramante apoyó su cúpula sobre arcos y pechinas que forman la base de la cúpula a una altura de unos 70 m. El tambor está formado por una corona de columnas y por sólidos machones P *(ver 1ª), que estarían unidos por dinteles y arcos de descarga (ver figs. 3, 4) Este apoyo heterogéneo podía dar motivo a la formación de asientos tanto más cuanto que en algunos pilares se colocarían escaleras, por lo que estarían debilitados, y sobre todo porque el considerable peso de la linterna fomentaría la formación de grietas.*
5. De una investigación del profesor A. Thiersch resulta que las proporciones de la cúpula concuerdan con las de otras partes de la iglesia.
(1, 1ª según Serlio-Letarouilly; 4. según A. Durand-Claye; 5. según Thiersch)

ya estaban terminados a la muerte de Bramante. Quizás se podría haber disminuido el efecto rellenando con fábrica algunos nichos, pero aún así es dudoso que con ello los pilares se hicieran más resistentes. La forma de los pilares es muy favorable dado que las pechinas apoyan directamente sobre ellos; los ángulos achaflanados forman realmente una continuación hacia abajo de las pechinas. Los pilares son enormes, su perímetro alcanza 72 m, pero en relación a la impresionante masa de la cúpula que deben soportar no son exageradamente pesados. Sin embargo, exigen una gran cantidad de material: el relleno interior se hizo con ladrillo, cascote y argamasa, y el revestimiento exterior de sillería de piedra. Esta fábrica se ejecutó con mortero hidráulico romano, pero los materiales heterogéneos pueden originar tensiones desiguales y como consecuencia formarse grietas.

En el citado dibujo de Heemskerk se puede ver que en la fábrica de los arcos penetran profundamente largos sillares de piedra situados a distancias aproximadamente iguales entre sí. Se aplicó aquí por tanto la técnica romana antigua.

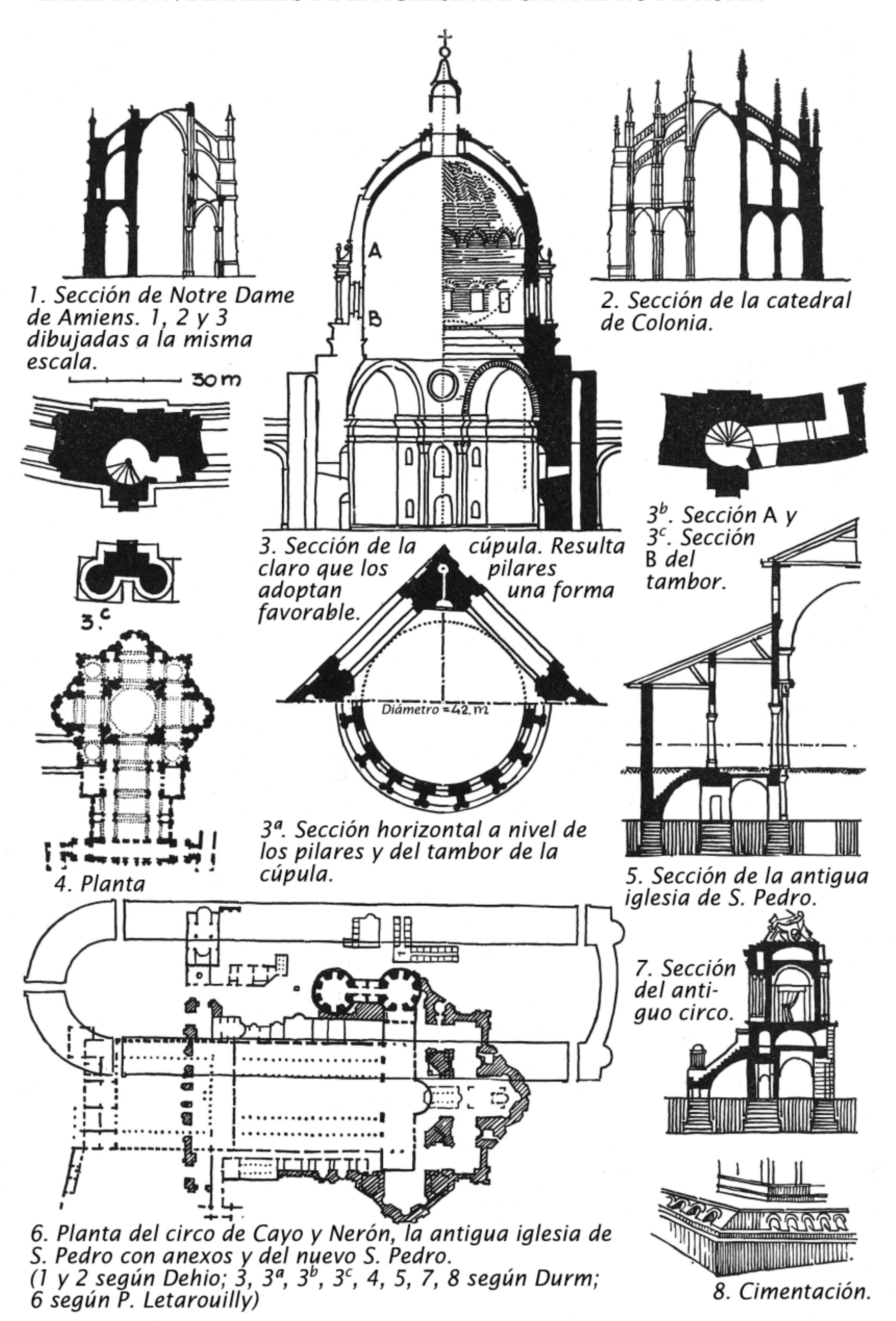
EL TAMBOR Y LA CÚPULA: En el tratado de Serlio hay un dibujo que indica cómo Bramante había pensado la construcción de la cúpula (Lám. 102, fig. 1).

Realmente no se puede decir que con él hubiera dicho su última palabra; el dibujo es demasiado poco elaborado como para poder sacar conclusiones definitivas sobre su construcción y sobre la manera en la que se habrían superado los diferentes problemas. Sí que es visible que Bramante había efectuado un buen estudio del Panteón de Roma. El peso de la cúpula es recogido, al igual que en el Panteón, por ocho pesados machones de fábrica unidos con arcos (Lám. 102, figs. 1ª, 3, 4).

Sin embargo, en lugar de la masa de fábrica que rodeaba la cúpula de Panteón y con la que en la construcción romana se absorbía el empuje, Bramante colocó una corona de columnas alrededor de la cúpula (Lám. 102, figs. 1, 10).

El proyecto de Bramante muestra diferentes deficiencias. En primer lugar, el apoyo de la cúpula es demasiado heterogéneo. La carga es absorbida en parte por los ocho machones de fábrica, pero también en parte por las columnas colocadas en el exterior. Se puede decir, sin exagerar, que las grietas habrían sido inevitables. Además, los machones están debilitados por la colocación de diversas esca-

LÁMINA 103. DETALLES DE LA IGLESIA DE SAN PEDRO DE ROMA



1. Sección de Notre Dame de Amiens. 1, 2 y 3 dibujadas a la misma escala.

2. Sección de la catedral de Colonia.

3. Sección de la cúpula. Resulta claro que los pilares adoptan una forma favorable.

3ª. Sección horizontal a nivel de los pilares y del tambor de la cúpula.

3ᵇ. Sección A y 3ᶜ. Sección B del tambor.

4. Planta

5. Sección de la antigua iglesia de S. Pedro.

6. Planta del circo de Cayo y Nerón, la antigua iglesia de S. Pedro con anexos y del nuevo S. Pedro.
(1 y 2 según Dehio; 3, 3ª, 3ᵇ, 3ᶜ, 4, 5, 7, 8 según Durm; 6 según P. Letarouilly)

7. Sección del antiguo circo.

8. Cimentación.

leras. Finalmente, la forma de la cúpula no es especialmente adecuada para sostener la pesada linterna.

En el proyecto de Miguel Ángel vemos que abandonó muy conscientemente el proyecto de su destacado antecesor, tomando decisiones técnicamente mucho más acertadas.

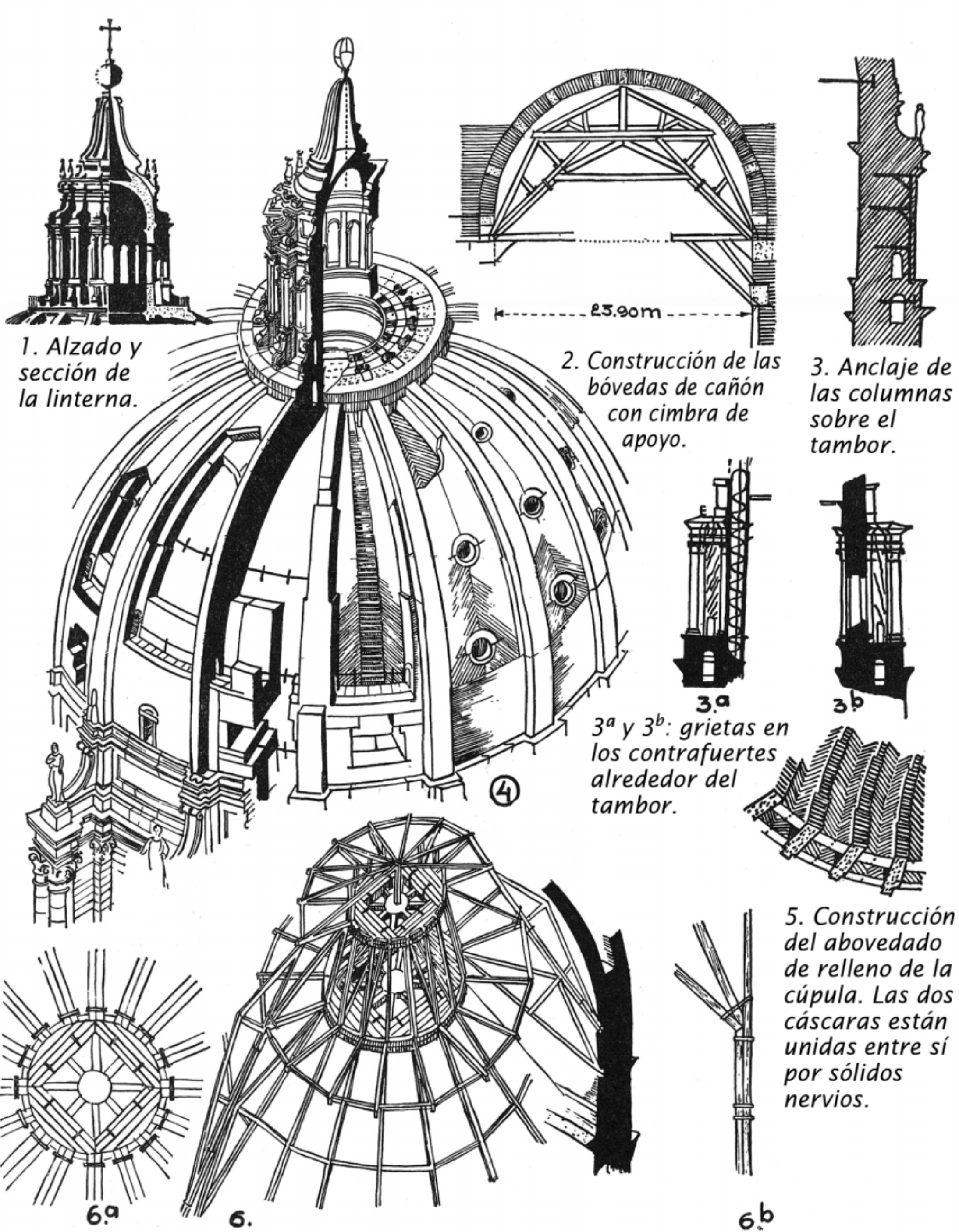
La cúpula viene a descansar sobre un tambor masivo perforado por dieciséis aperturas exactamente iguales. También aquí se sitúa una corona de columnas en el exterior, pero éstas están en casi toda su altura íntimamente unidas con el tambor (Lám. 103, figs. 3, 3ª). La forma de la cúpula se hizo más peraltada con lo que la linterna recibió un mejor apoyo.

Miguel Ángel proyectó una cúpula exterior y otra interior de espesores 0,50 m y 1,40 m, respectivamente, que iban unidas por fuertes anclajes de hierro en direcciones rectas y oblicuas, y entre las que había espacio para que pudiera circular el aire.

Sobre el tambor apoya la cúpula que, según Simil, tiene una luz de 41,44 m, un espesor en la base de 3 m y está macizada hasta aproximadamente dos quintos de su altura. A partir de ahí, los dieciséis nervios portantes de la cúpula se elevan separados del macizo y ascienden hasta encontrarse con el pesado anillo sobre el que se apoya la linterna. La forma de estos nervios merece nuestra atención. En la base tienen 1,80 m de ancho y 3 m de espesor, en la coronación 1 m de ancho y 5,20 de grueso. Además, reciben el peso de la linterna quedando en este punto sobrecargados; la forma elegida es muy favorable desde el punto de vista estático y el estrechamiento es agradable estéticamente (Lám. 104, fig. 4). Debido a la carga en la parte alta el empuje horizontal aumenta considerablemente. Por otra parte, son de temer tensiones de tracción ya que, aunque se asume que los nervios funcionan como elementos portantes, también habrá tensiones anulares de tracción puesto que los abovedados del casco están íntimamente unidos con los nervios.

Los constructores italianos sabían por experiencia que lo recomendable era colocar zunchos anulares para la absorción de dichas tracciones. Durante la construcción se colocaron tres zunchos; en 1743 y 1748 se añadieron aún otros seis más, cada uno con una sección de 5,30 × 8,90 cm, que se fijaron en la superficie exterior de la cúpula atados mediante uniones en cuña, todo ello según indica-

LÁMINA 104. DETALLES DE LA IGLESIA DE SAN PEDRO DE ROMA



4. Perspectiva de la cúpula. En el espacio hueco entre los cascos están colocadas escaleras y galerías.

6. Perspectiva del entramado de la cimbra para la construcción de la cúpula. Las fuertes vigas están sólidamente unidas por puntales.

6^a. Vista desde arriba del anillo superior. 6^b. Detalle de los pies derechos de apoyo. (según Durm)

ciones de Vanvitelli. Esto ocurrió después que diferentes expertos, entre los que sobre todo se debe citar a Poleni, llevaran a cabo una profunda investigación y detallados cálculos.

Sin embargo, a pesar de su genialidad, también esta cúpula tiene sus fallos, atestiguados en su construcción. El peso de la linterna, que Rondelet estima en 15.000.000 kg, es realmente demasiado grande como para que los nervios la puedan soportar con seguridad. Según él, la forma de la cúpula tenía que haber sido incluso más rígida para hacerlo sin mayores inconvenientes. También Scheffler, que llevó a cabo un análisis estático de la estabilidad de la cúpula, llegó a la misma conclusión. Según sus cálculos, el empuje horizontal exigiría una mayor masa de fábrica en la base o bien un zuncho de hierro con una sección de 34 × 36 cm. Debido a todo tipo de asientos han surgido grietas entre las cúpulas interior y exterior por lo que la linterna carga principalmente sobre la cúpula interior.

El defecto principal estriba sin embargo en el uso de materiales heterogéneos y en el desigual apoyo de la pesada cúpula, que carga en parte sobre el masivo tambor, pero también en parte sobre la corona de contrafuertes y columnas que hay en torno a ella, que son de diferente material. Además, en el machón adyacente a cuatro de estos contrafuertes se colocaron huecos para escaleras de caracol (Lám. 103, 3^{c}). Por otra parte, las columnas están hechas de grandes bloques de piedra, pero los rellenos están formados por fábrica de ladrillo, con lo que la magnitud de la retracción no es la misma y se han producido asientos. Por esta razón se han separado las columnas que apoyan el tambor en su parte exterior. Las grietas mayores están en los contrafuertes donde se sitúan las escaleras de caracol (Lám. 104, figs. $3^{a,\,b}$).

LA EJECUCIÓN: El modelo de madera de Miguel Ángel nos cuenta también todo sobre la forma en que se realizaron los anclajes entre las distintas partes. En el modelo, uno de los pilares sobre los que descansa el tambor se puede separar y sobre la sección están indicados con pintura azul los anclajes de hierro. También podemos ver en él que el recubrimiento exterior se ejecutó con grandes bloques de travertino mientras que el interior estaba hecho de mampostería (Lám. 104, fig. 3).

La cimbra empleada en la construcción de la cúpula fue dibujada por Fontana y por Bonanni en unos hermosos grabados mientras que P. Rocca dejó una deta-

llada descripción por escrito. La cimbra se levantó sobre el tambor y consistió en una construcción de madera de enormes dimensiones. Se utilizaron troncos de más de 22 m de longitud, tan gruesos, que dos hombres apenas podían rodearlos con los brazos abiertos. Durm hizo un bello dibujo de esta cimbra. (Lám. 104, figs. 2, 6).

En el Renacimiento los más grandes espíritus no consideraron incompatible con su dignidad dedicar todo su saber a la búsqueda de buenas armaduras para el soporte de cimbras y andamios, que no apoyaran en el suelosino que descansaran sobre un conjunto de mechinales practicados en los muros. Miguel Ángel proyectó, por ejemplo, un gran andamio móvil para la pintura de la Capilla Sixtina; Leonardo da Vinci y Giuliano da Sangallo hicieron máquinas para levantar grandes pesos. Más tarde este saber constructivo se llevará a sus máximos logros por Rondelet en las restauraciones del Panteón de París. (Lám. 268).

Aunque todo lo anterior demuestra el enorme cuidado que se tuvo en la ejecución de la cúpula de S. Pedro, no se pudo evitar que con el paso del tiempo aparecieran fallos. La influencia de los cambios de temperatura, asientos del terreno, caídas de rayos, etc. no son previsibles ni por el mejor de los constructores. Vista de cerca la cúpula muestra también multitud de irregularidades y deformaciones. Sin embargo, en proporción con la enormidad de la estructura, estos son de escasa dimensión, por lo que no se aprecian a simple vista desde el suelo.

Las formas: Si las muchas iglesias romanas con cúpula se comparan unas con otras se llega a la conclusión de que ningún perfil supera en pureza al de S. Pedro (Lám. 102, fig. 5). Se creía que este perfil tenía que ser una parábola o una catenaria, o bien una curva que no fuera expresada por una fórmula matemática sencilla. Redtenbacher llevó a cabo mediciones precisas que dieron por resultado que el arco de la cúpula era un segmento de circunferencia con un radio 7 / 12 de la luz. Letaronilly realizó también levantamientos muy precisos de la cúpula y llegó a la misma conclusión.

Mucho se ha escrito también sobre las proporciones de esta obra. El profesor Thiersch encontró que la proporciones de la cúpula mayor se corresponden totalmente con las de las menores (con una luz de 12 m) situadas sobre los cruceros

de las naves laterales. El profesor Brinckmann demostró cómo un bien meditado sistema de proporciones enlaza las diferentes formas del interior dentro de una totalidad superior. Desde el punto de vista estético, esta construcción es también un hito de la arquitectura, una creación insuperable del genio humano.

La cúpula de S. Maria dell'Umiltà de Pistoia

La cúpula de S. Maria dell'Umiltà tiene gran semejanza con la de la iglesia de S. Pedro de Roma (Lám. 105). El arquitecto, Giorgio Vasari, fue una gran admirador de Miguel Ángel y realmente en su mente estuvo también presente un gran ideal cuando comenzó su obra. Pero la fama que él esperaba nunca llegó; fue como si la fatalidad se hubiera instalado en esta obra: continuamente aparecieron grietas y la construcción provocó grandes críticas.

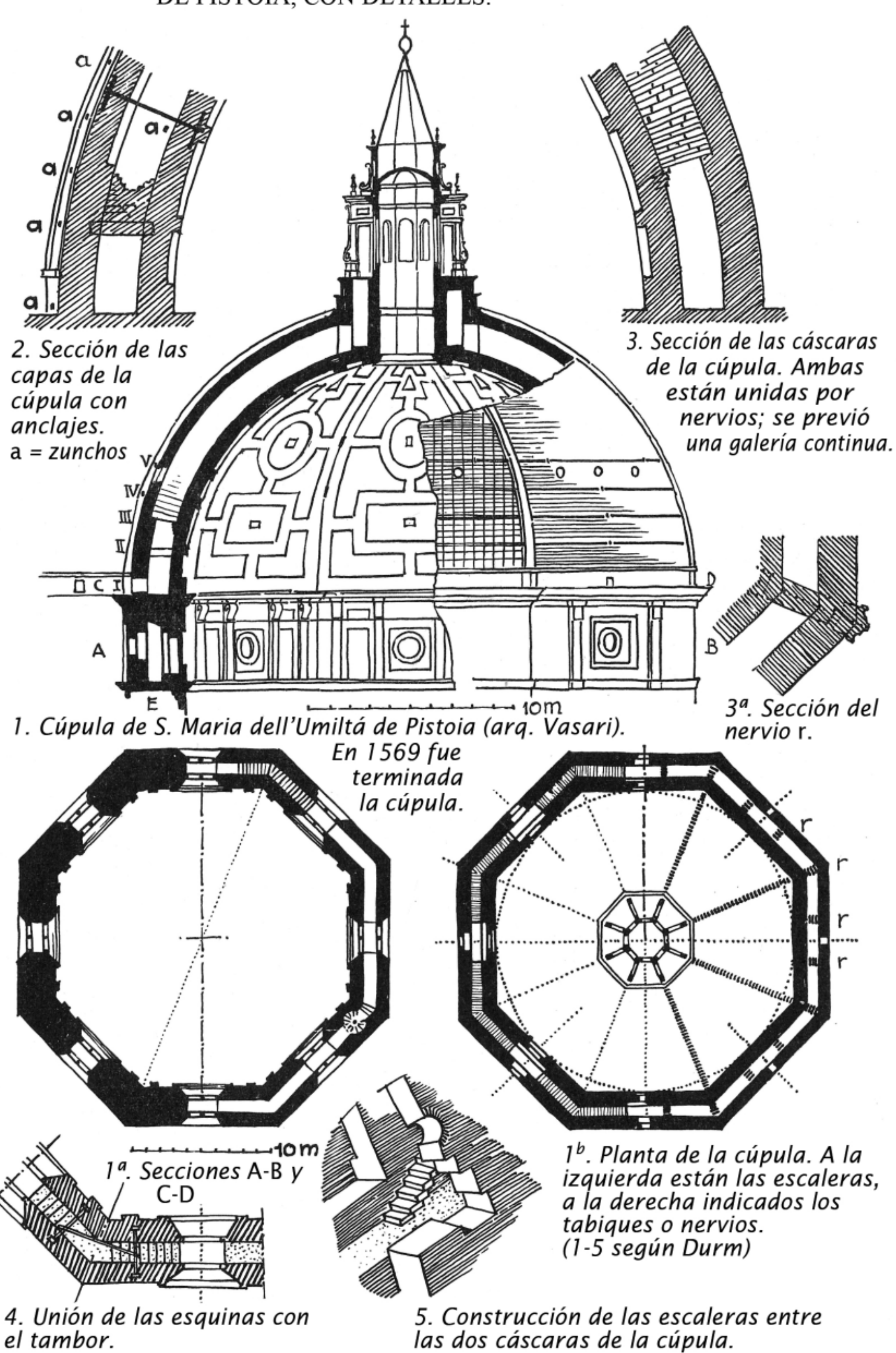
El primer crítico fue el mismo Vasari. Tuvo que construir la cúpula sobre los arcos y muros ya erigidos por su antecesor Venturi Vitona. Los cimientos se construyeron en 1495; a la muerte de Vitona ya estaban terminados los muros, pero los trabajos se pararon hasta que en 1561 Vasari emprendió la consecución del ideal de todo constructor del Renacimiento: una gran cúpula. Estudió las estructuras de la iglesia, en fase de construcción, y las consideró demasiado débiles, sobre todo porque el maestro constructor había perforado los muros con galerías. Vasari comenzó con el refuerzo de los muros; colocó fuertes anclajes e impulsó los trabajos tan enérgicamente que en 1567 la linterna ya estaba terminada y tres años más tarde la iglesia se pudo abrir el culto.

La cúpula es de doble casco; ambas partes están unidas en los ángulos por fuertes nervios que se proyectan hacia fuera con resaltos de piedra arenisca de 0,90 m de espesor.

Los paños de la bóveda están unidos por dos muros, que fueron construidos inadecuadamente, pues no enjarjan bien en los paños de las cáscaras.

La linterna tiene en relación al resto un peso enorme, con lo que se originan en ambos cascos de la cúpula grandes tensiones anulares. Vasari hizo introducir en la fábrica gruesos anclajes de hierro como refuerzo de los muros sobre los que la cúpula debía descansar. Pero para ello se tuvieron que hacer sesenta agujeros bastante profundos que debilitaron la fábrica.

LÁMINA 105. CONSTRUCCIÓN DE LA CÚPULA DE S. MARIA DELL'UMILTÁ DE PISTOIA, CON DETALLES.



2. Sección de las capas de la cúpula con anclajes.
a = zunchos

3. Sección de las cáscaras de la cúpula. Ambas están unidas por nervios; se previó una galería continua.

1. Cúpula de S. Maria dell'Umiltá de Pistoia (arq. Vasari). En 1569 fue terminada la cúpula.

3ª. Sección del nervio r.

1ª. Secciones A-B y C-D

1ᵇ. Planta de la cúpula. A la izquierda están las escaleras, a la derecha indicados los tabiques o nervios.
(1-5 según Durm)

4. Unión de las esquinas con el tambor.

5. Construcción de las escaleras entre las dos cáscaras de la cúpula.

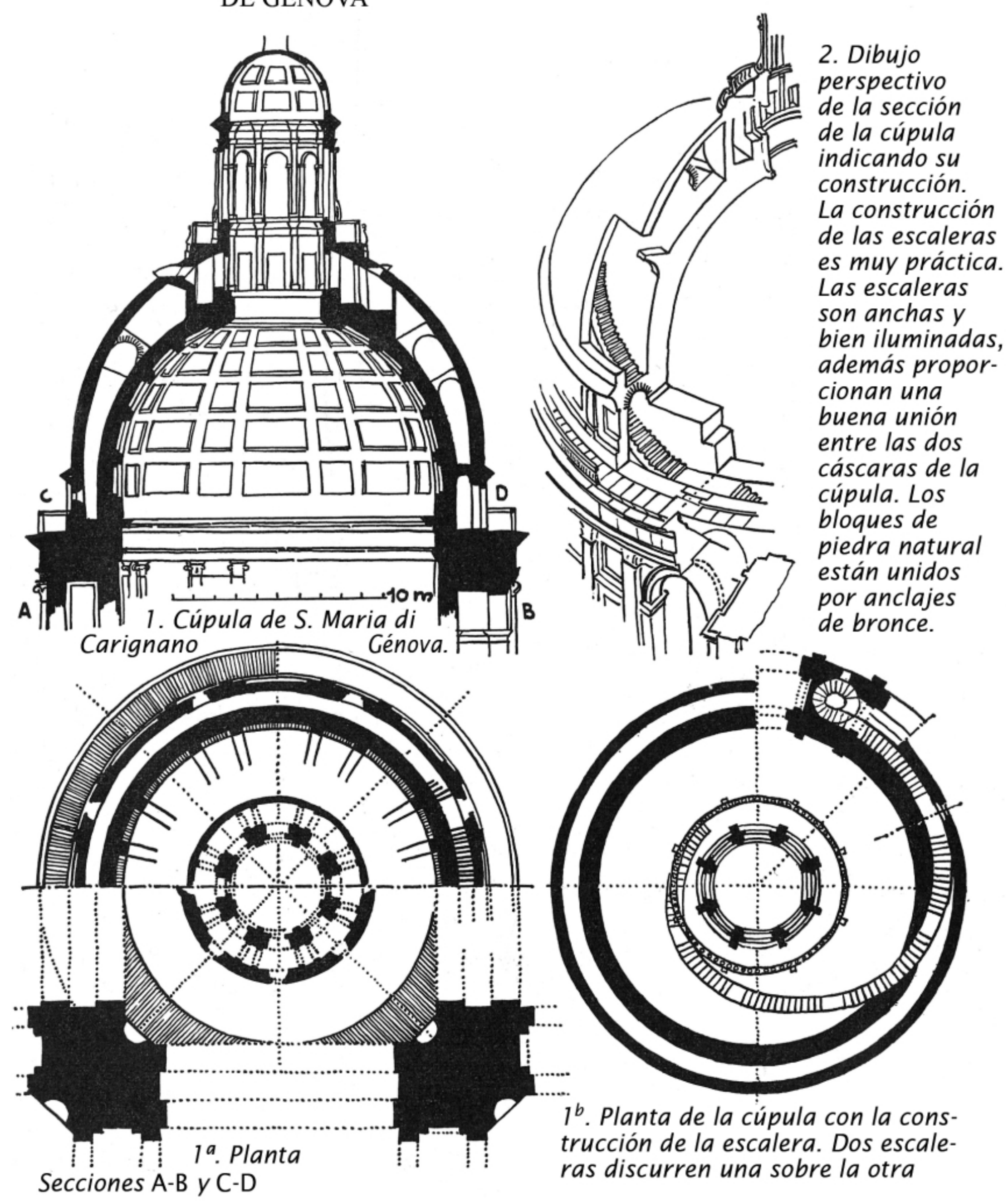
El continuador de Vasari fue Jacopo Lafri, que comenzó realizando un extenso estudio y, a continuación, una crítica nada amable sobre el trabajo de su antecesor. Consideró en primer lugar que el proyecto de Vasari era menos bello que el de Vitona; después rechazó la manera en que los anclajes se habían dispuesto en la iglesia y, finalmente, consideró que la linterna tenía un peso excesivo. Según su propuesta, habría primero que demoler la linterna y, después, inspeccionar si los asientos dejaban de producirse.

Es cierto que Vasari no partió de una completa libertad. Tuvo que disponer una escalera en espiral entre las dos cúpulas y justo sobre ese sitio fue visible la primera grieta. Se inició entonces una lucha entre el maestro constructor por un lado y la masa de fábrica por otro. Trató de cerrar la grieta colocando anclajes y lo consiguió, pero aparecieron nuevas grietas junto a las anteriores para, finalmente, separarse y quedar sin unión todo tipo de partes entre sí. Los muros se soltaron de los paños de la cúpula y lo mismo sucedió con la cúpula exterior respecto a los tabiques y las escaleras.

Lafri constató que la cúpula exterior estaba más gravemente agrietada que la interior. En circunstancias normales el caso hubiera sido el contrario. Pero aquí se había colocado un fuerte anillo de hierro alrededor de la cúpula para mantenerla con la forma adecuada. Lafri era de la opinión de que a la larga no se podía contar con tal zuncho. Sin embargo, indicó como mejora que se tenía que poner un eficaz refuerzo de hierro alrededor de la cúpula y de la linterna. Además se tenían que colocar fuertes vigas de madera de castaño como unión y realizar todo tipo de rejuntados. Se limitó al zunchado de la linterna con bandas de hierro y circundó la cúpula con anillos de hierro de 5×5 cm de sección.

Esta breve consideración sobre la construcción de la cúpula de S. Maria dell'Umiltà muestra una vez más que hay muchos problemas ligados a la ejecución de una obra importante. Para ello se debe de disponer de una gran experiencia profesional que Vasari, que originalmente era pintor, no poseía a pesar de sus innegables talentos. Si le hubiera dado a la cúpula un perfil más apuntado y la linterna no se hubiera hecho tan desmesuradamente pesada muchos desperfectos no hubieran ocurrido.

LÁMINA 106. CONSTRUCCIÓN DE LA CÚPULA DE S. MARIA Di CARIGNANO DE GÉNOVA



1. Cúpula de S. Maria di Carignano Génova.

2. Dibujo perspectivo de la sección de la cúpula indicando su construcción. La construcción de las escaleras es muy práctica. Las escaleras son anchas y bien iluminadas, además proporcionan una buena unión entre las dos cáscaras de la cúpula. Los bloques de piedra natural están unidos por anclajes de bronce.

1ª. Planta Secciones A-B y C-D

1ᵇ. Planta de la cúpula con la construcción de la escalera. Dos escaleras discurren una sobre la otra

El proyecto de la cúpula fue realizado por Galeazzo Alessi; se terminó en 1575. La cúpula es de dos cáscaras. La cúpula interior de casetones tiene en el arranque un espesor de 1,08 m, la exterior 0,57 m, están a 0,80 m una de otra en la base; en la coronación a 1,13 m. Las cáscaras están unidas por 12 arcos de 0,40 m de ancho. Está ejecutada con gran cuidado. Los arcos y pechinas están construidos con piedra de gran dureza; de trecho en trecho se empotraron pesados perpiaños de piedra. Las cáscaras de la cúpula son de ladrillo. El agua infiltrada se puede eliminar fácilmente debido a que se hicieron canalones y tuberías de evacuación (1-2 según Durm)

Pero también de los fallos se puede aprender, y por eso no tenía que faltar esta importante obra en un estudio sobre la construcción abovedada.

La cúpula de la catedral de S. Pablo de Londres

Sir Christopher Wren (1632–1723), fue un erudito y sobresaliente matemático y físico, pero como arquitecto fue un hombre hecho a sí mismo que no había disfrutado de una verdadera educación profesional. Sin embargo, pudo evolucionar hasta convertirse en uno de los más grandes maestros constructores, hasta ser el arquitecto del lugar de culto de la iglesia protestante anglicana, realizando una de las más intrépidas construcciones de todos los tiempos en la cúpula de la catedral de S. Pablo. En 1665 viajó por Francia donde entró en contacto con los más grandes constructores del barroco que habían estado ocupados con los problemas de la construcción de cúpulas.

De vuelta a Londres, su vida estuvo unida a los planes para la restauración de la antigua catedral de S. Pablo y después, cuando los planes de restauración se descartaron, a los de la construcción del nuevo S. Pablo.

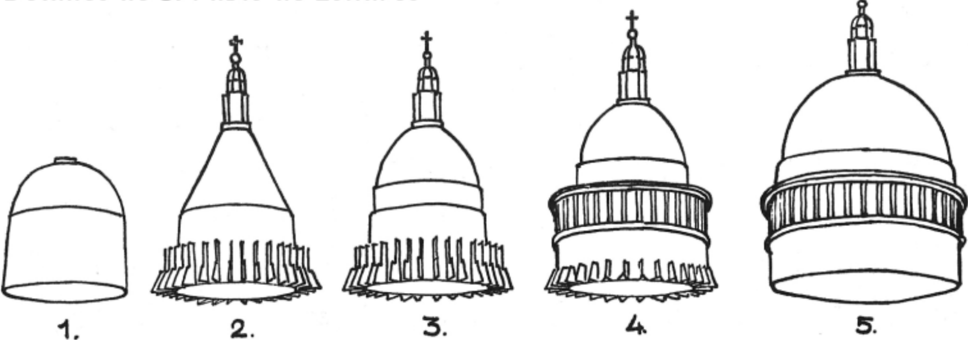
La cimentación: La nueva iglesia tenía que levantarse sobre el lugar de la antigua y ruinosa iglesia gótica cuya cimentación había estado presionando el suelo durante siglos. A fin de mantener los cimientos de la nueva iglesia separados de los de la obra antigua, colocó el eje de la nueva iglesia formando un pequeño ángulo con el de la antigua ; sin embargo, un pilar se mantuvo en la posición donde estaban los antiguos cimientos y más tarde resultó que este pilar asentó menos que los otros pilares bajo el gran peso de la cúpula (Lám. 107, fig. 10). La cimentación se apoyó sobre un estrato de arcilla cuya profundidad variaba entre 1,50 y 2 m; debajo se encontraba una capa de aproximadamente 10,60 m, consistente en grava y arena mezclada con conchas marinas bajo la cual yacía la densa arcilla londinense.

Wren opinaba que este terreno era fiable puesto que había soportado la construcción gótica sin mayores problemas durante siglos. En la época de Wren existía un estado de equilibrio, que fue roto cuando años más tarde se hizo una profunda excavación y, por medio de un drenaje, se extrajo agua y arena de debajo de los cimientos. La estabilidad se puso en peligro y muchas voces se alzaron contra los

LÁMINA 107. SISTEMA DE CÚPULAS COMPUESTAS DE LA CATEDRAL DE S. PABLO DE LONDRES, CON DETALLES

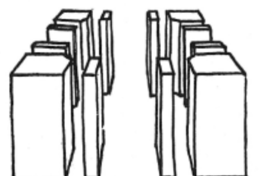
Detalles de S. Pablo de Londres



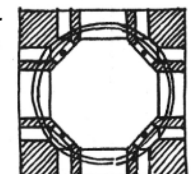


1. Cúpula interior. 2. Cúpula cónica colocada sobre ella; se dispusieron salientes en ménsula para repartir el peso sobre los pilares y arcos.

3. Se añade la cúpula exterior.
4. Se añade la galería de columnas sobre el tambor.
5. La sección de la cúpula debía haber sido mucho mayor para cargar con su peso los machones.

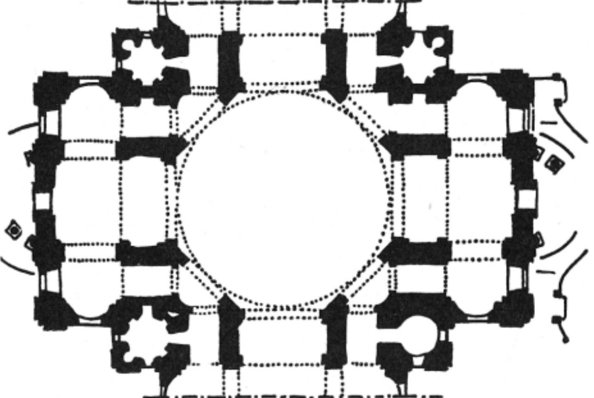


6. Sistema de apoyos inferiores.





7. Aquí se indica la manera en que se cargan los pilares y los machones.

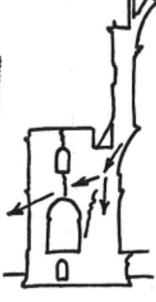


8. Planta de la cúpula con pilares y elementos de contrarresto.



9. Sección dada sobre los pilares. Es evidente que la gran carga puede producir asientos desiguales.(cifras en pies y pulgadas).

10. Planta del nuevo S. Pablo con la del antiguo marcada por puntos. La nueva planta está girada un pequeño ángulo a fin de dejar libres los cimientos de la antigua iglesia.



11. Sección por uno de los pilares. La cúpula carga sobre el frente del pilar y se transmite por la pechina, produciendo un empuje inclinado.

(1-7, según Ch. Barman; 8, 10, 11 según W. Harvey)

trabajos en el subsuelo próximo a la iglesia. Los cimientos se ensancharon y unieron entre sí mediante arcos invertidos. El espacio resultante entre medias se cargó con pesadas piedras para prevenir la elevación del terreno que recibía por los pilares una tensión, de 0,6 N/mm^2.

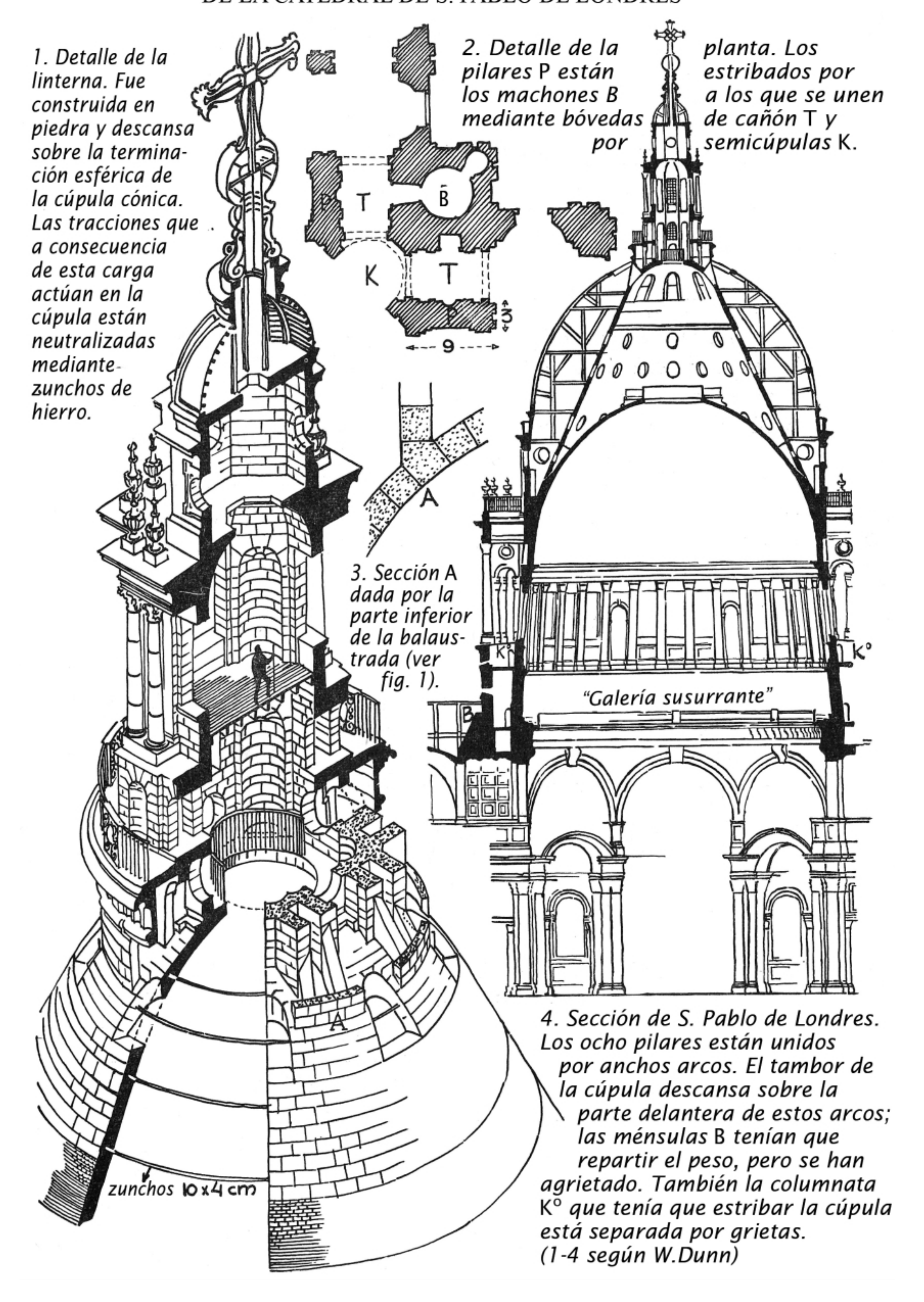
PILARES Y ARCOS: La cúpula está soportada por ocho pilares rectangulares de 3 × 9 m que están unidos a cuatro pesados machones de fábrica en las esquinas, que hacen de contrarresto (Lam. 107, fig. 8). Estos machones reciben sólo una pequeña parte de la carga vertical y sufrieron asientos menores que los pilares.

La mayor parte del peso de la cúpula, unas 23.000 toneladas, descansa sobre la zona delantera de los pilares. Éstos presentan una construcción heterogénea; constan de un núcleo de mampostería y argamasa rica en cal rodeado por un paramento de sillares de piedra dura de Portland con juntas de poco espesor. Resulta difícil saber cuanta tensión recae sobre las partes más cargadas. Además, hay también diferencia en la medida de la retracción de este material heterogéneo, por lo que la mayor parte del peso viene a recaer sobre los paramentos que, debido a las enormes tensiones, tienden a separarse del resto (Lám. 107, fig. 9). Puesto que el peso de la cúpula se transmite a través de las pechinas y los arcos, la carga vertical se convierte en empujes inclinados. Como los arcos torales no están cargados sobre su ancho total por el peso de la cúpula, y los menores sólo tienen un reducido espesor, los pilares, que no están dispuestos radialmente, reciben cargas excéntricas (Lám. 107, fig. 11; Lám. 108, fig. 4).

Los factores aquí mencionados: terreno no fiable, cargas excéntricas en los pilares y composición heterogénea de los elementos constructivos, fueron los principales causantes de que la resistencia del conjunto se pusiera en peligro con el paso del tiempo.

Ya durante la ejecución la cúpula se inclinó 15 cm hacia el sureste. El pilar sureste ha sido restaurado tan a menudo que su parte exterior es prácticamente nueva. Todos los pilares han asentado en mayor o menor medida y, debido a estos asientos desiguales, la base de la cúpula ya no está sobre un plano horizontal.

LÁMINA 108. SECCIÓN DE LA CÚPULA Y DETALLES DE LA LINTERNA DE LA CATEDRAL DE S. PABLO DE LONDRES



1. Detalle de la linterna. Fue construida en piedra y descansa sobre la terminación esférica de la cúpula cónica. Las tracciones que a consecuencia de esta carga actúan en la cúpula están neutralizadas mediante zunchos de hierro.

2. Detalle de la planta. Los pilares P están estribados por los machones B a los que se unen mediante bóvedas de cañón T y por semicúpulas K.

3. Sección A dada por la parte inferior de la balaustrada (ver fig. 1).

4. Sección de S. Pablo de Londres. Los ocho pilares están unidos por anchos arcos. El tambor de la cúpula descansa sobre la parte delantera de estos arcos; las ménsulas B tenían que repartir el peso, pero se han agrietado. También la columnata K° que tenía que estribar la cúpula está separada por grietas. (1-4 según W.Dunn)

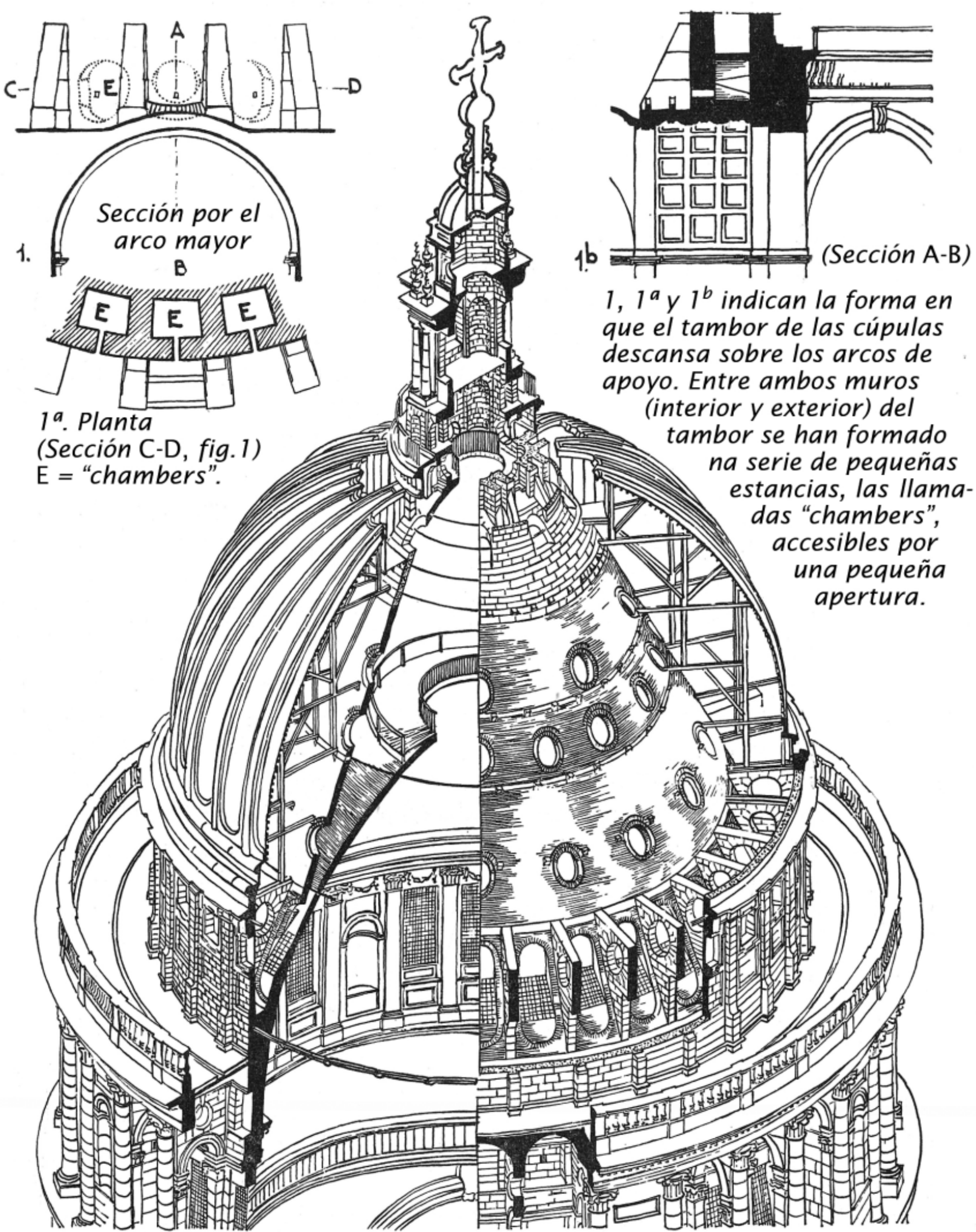
Los arcos torales que unen los pilares apenas han asentado. Fueron construidos con gran inteligencia: están constituidos por una serie de nervios de piedra dura tendidos unos junto a otros y unidos mutuamente por arcos invertidos. Evidentemente Wren pretendió con ello trasladar el peso la cúpula sobre el ancho total de los arcos, aunque esto fue imposible dada la gran excentricidad (Lám. 110). Los arcos que discurren en la dirección diagonal tienen un ancho menor que los torales, de manera que su peso, aumentado con el del tambor y la cúpula, viene a cargar muy localizadamente sobre los pilares (Lám. 107, fig. 8). Barman (1925) consideró que este fue el mayor fallo constructivo cometido por Wren. Pensaba que se podía constatar que los pilares estaban curvados por efecto de las enormes presiones locales.

LAS CÚPULAS: Es en la construcción de la cúpula donde mejor se aprecia el genio de Wren como maestro constructor. La totalidad es un conjunto de cúpulas que montadas sobre un alto y ascendente tambor de forma ligeramente cónica descansa sobre los arcos torales y las pechinas (Láms. 108, 109). La cúpula exterior es de madera recubierta con una gruesa capa de plomo; la segunda cúpula sirve de apoyo a las 800 toneladas de la pesada linterna; es de forma cónica y por ello excelentemente adecuada para su trabajo. Si no hubiera estado cerrada en la parte superior por una bóveda esférica no se hubieran producido en ella tensiones anulares concentradas. El precedente de esta cúpula se encuentra en el baptisterio de Pisa, cuya construcción es de época románica (Lám. 99, fig. 3).

Para eliminar las tensiones anulares Wren puso en el extremo superior una serie de cuatro sólidos zunchos de hierro de 25 cm^2 de sección, situados unos debajo de otros dentro de anillos de piedras cajeadas; además, más abajo, dispuso también una pareja de zunchos que debían oponerse a una posible tendencia de la cúpula a abrirse (Lám. 109, fig. 2).

La tercera o cúpula interior, que tiene un espesor de unos 45 cm, muestra un perfil circular peraltado que facilitó su ejecución. (Un notable fenómeno acústico actúa en la galería que se encuentra bajo esta cúpula. El sonido que se produce por debajo de la cúpula se concentra en esta galería por la reflexión sobre

LÁMINA 109. SECCIÓN DE UNO DE LOS GRANDES ARCOS Y PERSPECTIVA AXONOMÉTRICA DE LA CÚPULA DE LA CATEDRAL DE S. PABLO DE LONDRES



2. Construcción de la cúpula triple de la catedral de S. Pablo de Londres (según un dibujo de Mervyn E. Macartney F.S.A).
La unión entre las tres cúpulas se consigue en el arranque por una serie de pequeños muros de apoyo triangulares y por sólidas estructuras de madera. Distintos anillos discurren alrededor de las cúpulas de fábrica. El tambor está también zunchado a la altura de la cornisa superior.

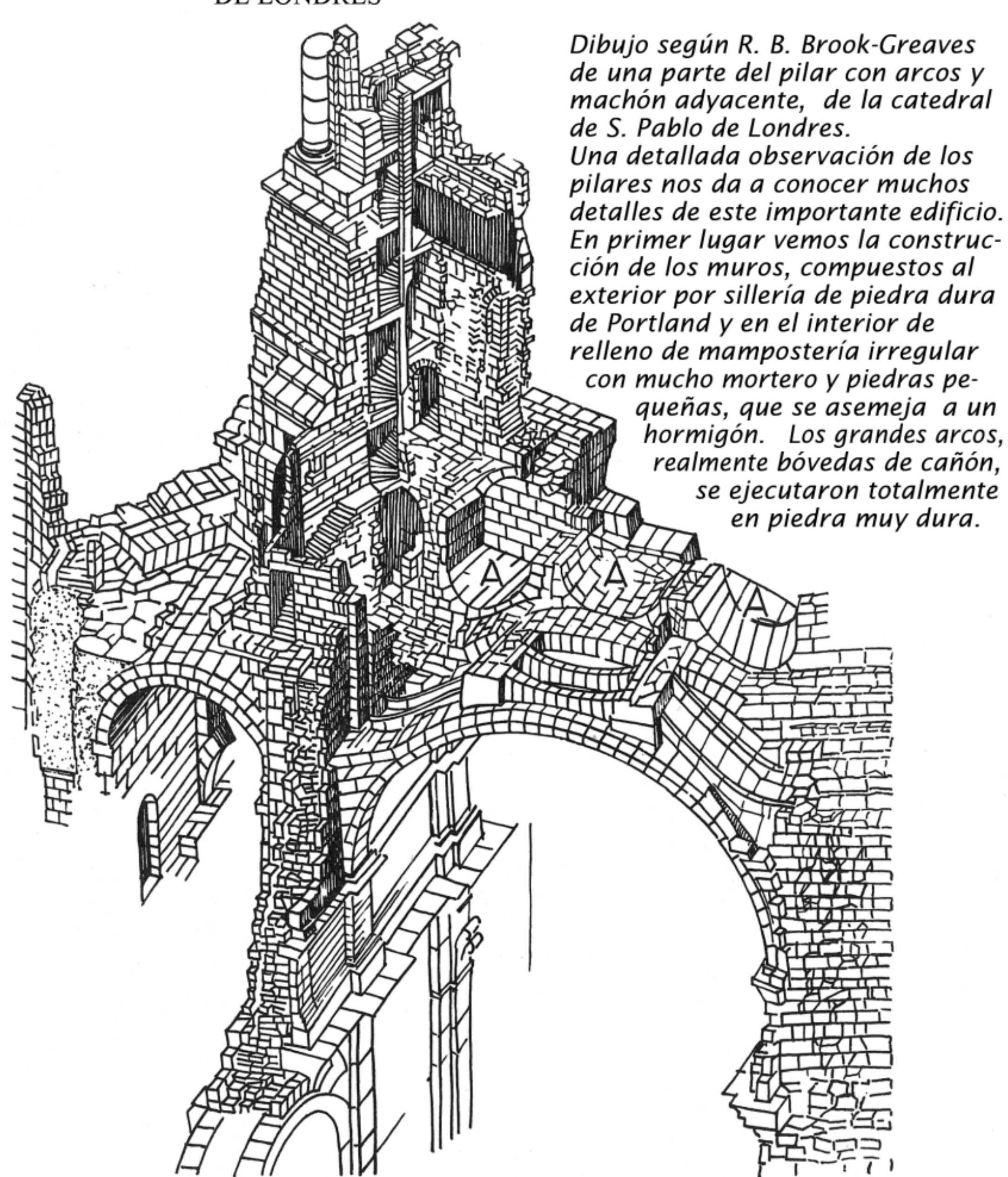
la cúpula. A ello se debe el nombre de «galería susurrante».) Tanto esta forma como el gran óculo en la coronación colaboran a reducir a un mínimo las tensiones anulares. Sin embargo, no se pudieron eliminar por completo, por lo que se dispuso un pesado de zuncho alrededor de la cúpula: se colocaron ocho barras de hierro, con una sección total de 50 cm^2, en longitudes de 2,50 m y firmemente unidas entre sí. Estas uniones se rellenaron cuidadosamente con plomo fundido.

En la base, ambas cúpulas forman una unidad. El tambor es doble y ambos muros están mutuamente unidos por treinta y dos muros contrafuertes que se proyectan hacia fuera. Evidentemente, se trataba de repartir lo mejor posible el peso de la cúpula sobre los pilares y arcos torales (Lám. 108, fig. 4). Merece la pena someter al sistema de apoyo a un examen más detallado. En primer lugar están los arcos torales que, al ser anchos, reparten bien la carga (Lám. 109, fig. 1^b). Después, siguen los arcos más pequeños que discurren en la dirección de las diagonales. Por su menor tamaño la distribución no se realiza adecuadamente. En tercer lugar, están los puntos extremos de algunas ménsulas, que descansan sobre los machones de las esquinas. Puesto que era previsible que estos pesados puntos de apoyo cargaran poco, asentarían menos que los ocho pilares, y se tendría aquí que hablar de un defecto de Wren. Pero, según Barman, Wren mostró precisamente aquí un entendimiento fuera de lo común. Las ménsulas no son lo suficientemente fuertes como para, al asentar los pilares, trasladar el peso a los machones; se agrietarían si la carga vertical se hace demasiado grande. Ahora bien, entonces la carga total causada por la cúpula descansa solamente sobre los arcos, que sí pueden ceder, pero cuyos asientos son aproximadamente los mismos en cada uno de los ocho pilares.

En realidad, después del paso del tiempo los asientos no han desaparecido y, además, son desiguales en contradicción con las consideraciones de Barman. En consecuencia, el tambor interior y el exterior están completamente separados el uno del otro y han surgido grietas en todas direcciones, de manera que la solidez del monumento ya no queda asegurada. Incluso también se han soltado las hiladas de unión entre la cúpula cónica y el muro exterior vertical.

Además de las cargas desiguales y excéntricas, la influencia de la temperatura ha jugado también un papel en estos fenómenos.

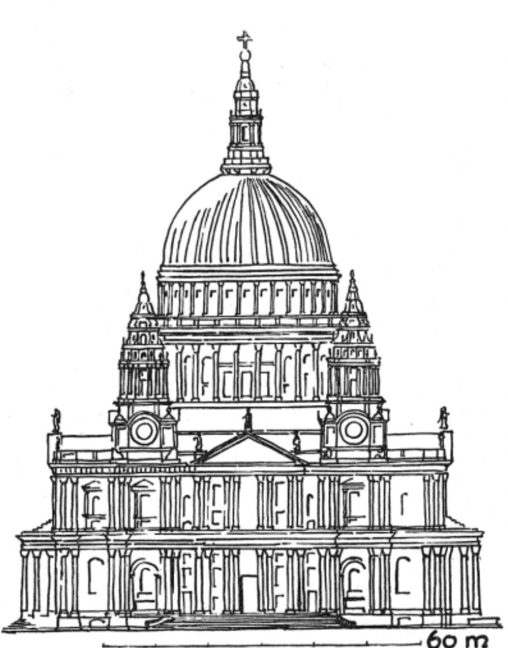
LÁMINA 110. PERSPECIVA AXONOMÉTRICA DE UNO DE LOS PILARES CON LOS ARCOS DE UNIÓN DE LA CATEDRAL DE S. PABLO DE LONDRES



Dibujo según R. B. Brook-Greaves de una parte del pilar con arcos y machón adyacente, de la catedral de S. Pablo de Londres.
Una detallada observación de los pilares nos da a conocer muchos detalles de este importante edificio. En primer lugar vemos la construcción de los muros, compuestos al exterior por sillería de piedra dura de Portland y en el interior de relleno de mampostería irregular con mucho mortero y piedras pequeñas, que se asemeja a un hormigón. Los grandes arcos, realmente bóvedas de cañón, se ejecutaron totalmente en piedra muy dura.

Hasta aproximadamente la mitad de su flecha fueron cuidadosamente rellenados y, sobre el tradós del arco, reforzados por un complicado sistema de pequeños arcos y contra-arcos. El gran peso de las cúpulas descansa de forma directa solamente sobre una parte del arco, de manera que Wren esperaba conseguir que mediante esta subdivisión este peso se repartiera completa y lo más uniformemente posible sobre la bóveda de cañón.El pesado machón emergente en cuyo interior se incluyeron escaleras tenía que asegurar la estabilidad y dar un apoyo extra a las bóvedas, de manera que se contrarrestase su tendencia a desviarse lateralmente. Las llamadas "chambers" están en A.

LÁMINA 111. ALZADO DE LA CATEDRAL DE S. PABLO DE LONDRES CON DETALLES DE LA CÚPULA Y DE LA LINTERNA



1. Alzado de la catedral de S. Pablo de Londres.

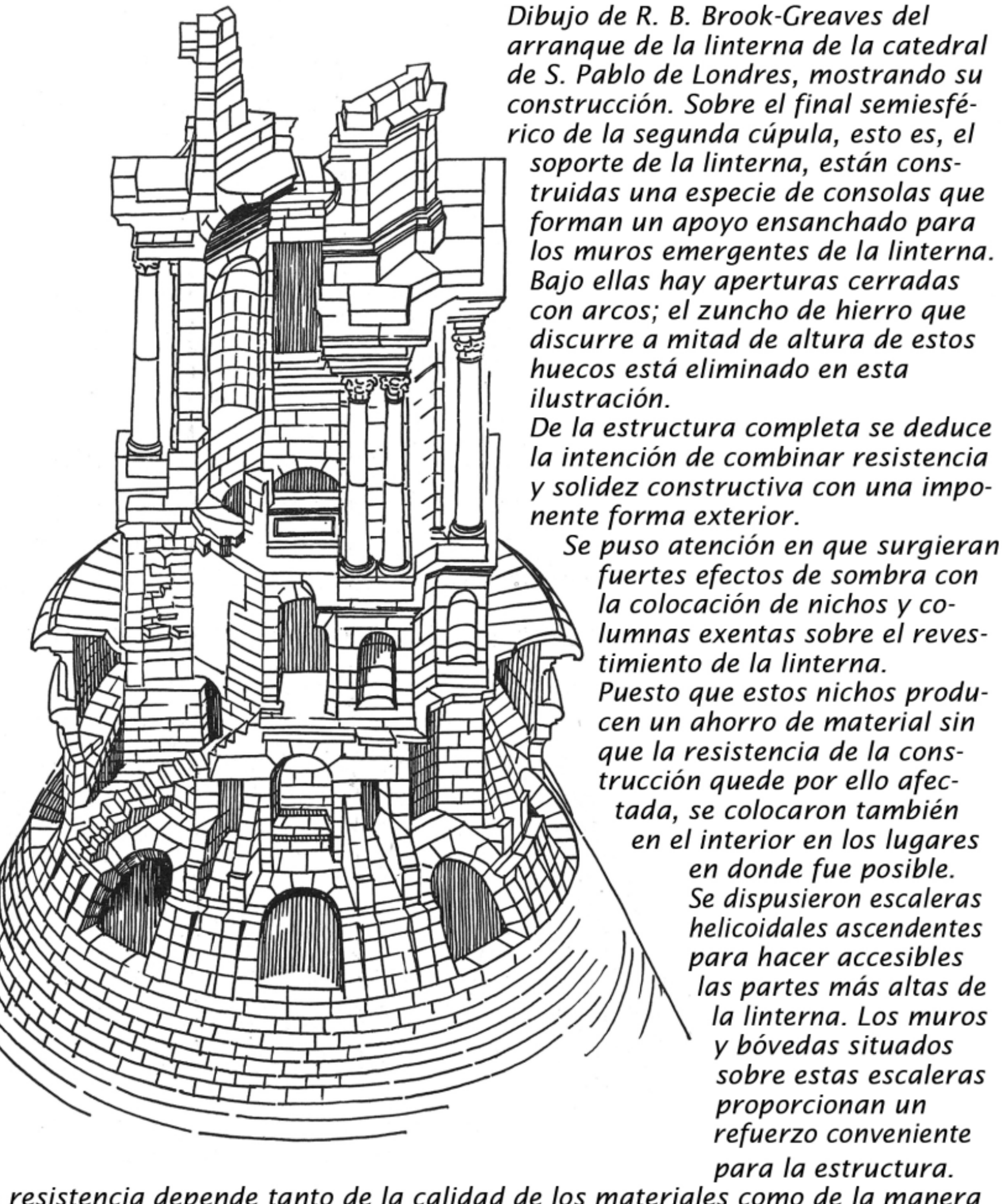
2. Perspectiva isométrica de la cúpula por R. B. Brook-Greaves y W. Godfrey Allen. Este dibujo extraordinariamente bello del que la reproducción inferior es una parte, mide 2,45 x 3,70 m. Se aprecia claramente la manera en que las cúpulas de ladrillo se unen entre sí, a la vez que se hace comprensible la función de contrarresto la columnata que circunda el tambor.
La enorme masa del conjunto de las cúpulas ejerce un empuje en dirección oblicua; las columnas, arcos y pilastras de la hilera de columnas actúan en dirección opuesta y su función es comparable con la de los arbotantes de la iglesias góticas. Además cargan su masa para repartir el peso de la cúpula todo lo posible sobre los arcos torales.

3. Sección de la linterna medida y dibujada por H. Wright y C. G. Sykes.

2

3

LÁMINA 112. ESTEREOTOMÍA DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA LINTERNA DE LA CATEDRAL DE S. PABLO DE LONDRES



Dibujo de R. B. Brook-Greaves del arranque de la linterna de la catedral de S. Pablo de Londres, mostrando su construcción. Sobre el final semiesférico de la segunda cúpula, esto es, el soporte de la linterna, están construidas una especie de consolas que forman un apoyo ensanchado para los muros emergentes de la linterna. Bajo ellas hay aperturas cerradas con arcos; el zuncho de hierro que discurre a mitad de altura de estos huecos está eliminado en esta ilustración.
De la estructura completa se deduce la intención de combinar resistencia y solidez constructiva con una imponente forma exterior.

Se puso atención en que surgieran fuertes efectos de sombra con la colocación de nichos y columnas exentas sobre el revestimiento de la linterna.
Puesto que estos nichos producen un ahorro de material sin que la resistencia de la construcción quede por ello afectada, se colocaron también en el interior en los lugares en donde fue posible.
Se dispusieron escaleras helicoidales ascendentes para hacer accesibles las partes más altas de la linterna. Los muros y bóvedas situados sobre estas escaleras proporcionan un refuerzo conveniente para la estructura.
Su resistencia depende tanto de la calidad de los materiales como de la manera en la que la fábrica del muro se reparte sobre los pilares y columnas. Esto se realizó con gran cuidado; la estereotomía está ejecutada con maestría y las zonas débiles de los muros perimetrales, tales como las aperturas de ventanas y nichos están hechas con piedra dura. A pesar del talento de Wren y sus ayudantes vemos en el dibujo que se cometieron fallos de ejecución. Las columnas están formadas por grandes piezas de piedra mientras que los muros están rellenos de mampostería pudiendo dar lugar a asientos desiguales.

Según el arquitecto alemán Nonn, en la época ligado a la embajada en Londres, los pesados, los zunchos anulares de hierro, que todavía hoy se conservan, situados en la cúpula y el tambor, pueden, debido a su posición cercana al exterior de la fábrica, haber causado un desigual reparto de la tensión. El deseo de salvar este monumento nacional ha puesto en movimiento muchas plumas. A lo largo de los años se han constituidos diferentes comisiones gubernamentales, que han publicado voluminosos informes y bajo cuya dirección se ha iniciado la restauración de la cúpula, que en una gran parte está ya completada.

La cúpula del Panteón de París (Santa Genoveva)

En 1755 J. G. Soufflot recibió el encargo de hacer un proyecto para la iglesia de Santa Genoveva que, según su promotor el marqués de Martigny intendente de construcciones de Luis XV, debía superar en belleza y regularidad arquitectónica a toda construcción de iglesia levantada con anterioridad. Soufflot hizo un viaje de estudio a Italia con el marqués, en el que sobre todo fueron los clásicos los que cautivaron su atención.

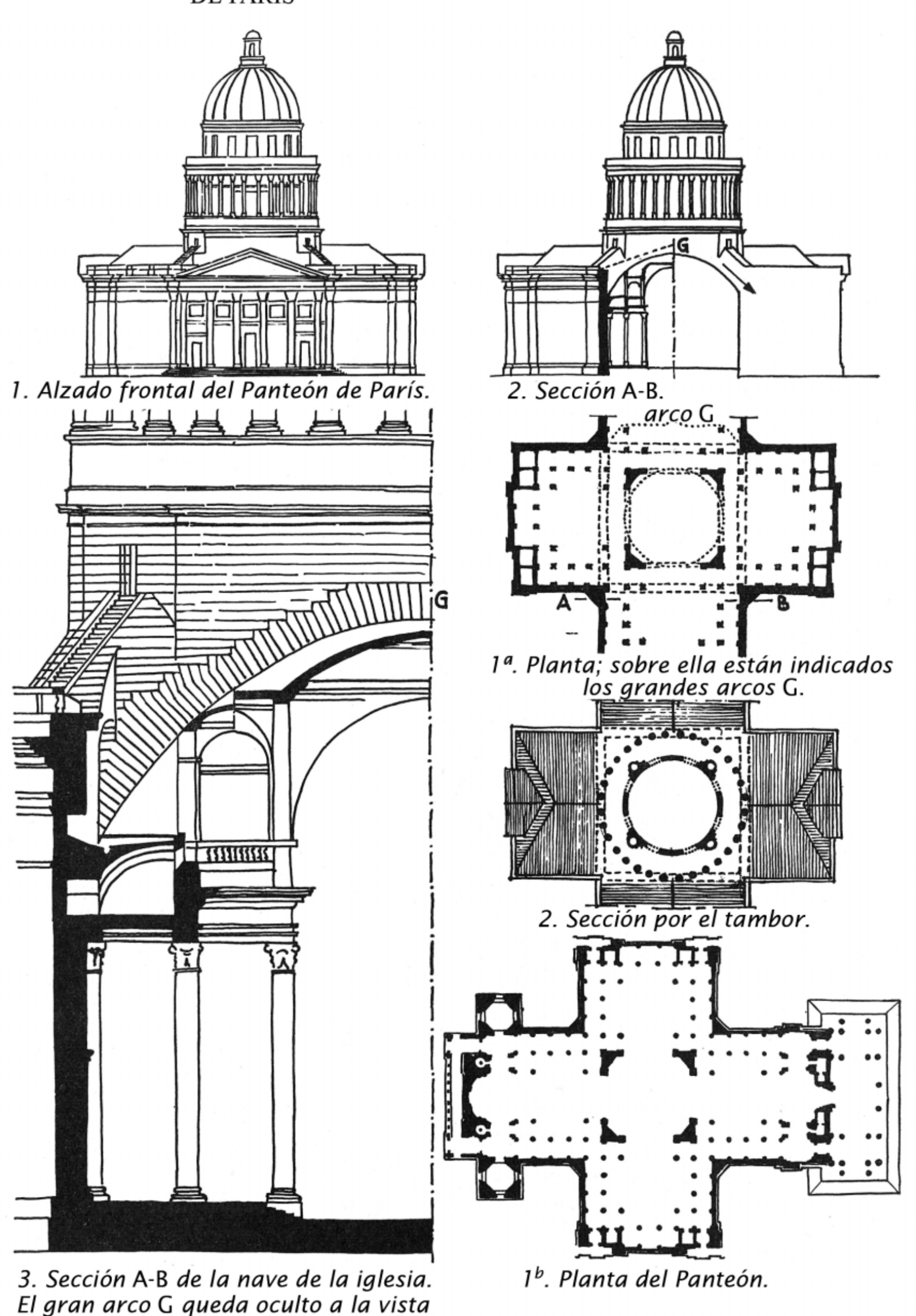
La construcción tuvo lugar entre 1764 y 1790; después de la muerte de Soufflot se hizo cargo de la dirección su sobrino F. Soufflot, que contó con la colaboración de otros expertos como Rondelet y Brébion. La planta tomó la forma de una cruz griega en cuyo centro, sobre cuatro pilares, se erige una cúpula de más de 20 m de luz, que forma el punto álgido de la iglesia (Lám. 113).

Durante la ejecución, y también después, se plantearon varias cuestiones constructivas que dieron lugar a vivas polémicas y a muchos informes periciales. De su estudio se puede obtener una excelente comprensión de estos problemas; es una lectura extremadamente instructiva para los constructores de bóvedas.

La cúpula consta de tres cáscaras. A través de la primera, una cúpula de casetones semicircular se tiene una visión de la segunda de perfil parabólico. La tercera cúpula, también parabólica, ayuda a la segunda en el soporte de la linterna; por el exterior está provista de nervios y por el interior de nichos (Lám. 114, fig. 4).

Este conjunto de cúpulas está contrarrestado en su parte inferior, en el tambor, por una corona de columnas.

LÁMINA 113. CONSTRUCCIÓN Y DETALLES DE LA CÚPULA DEL PANTEÓN DE PARÍS



1. Alzado frontal del Panteón de París.

2. Sección A-B.

1ª. Planta; sobre ella están indicados los grandes arcos G.

2. Sección por el tambor.

3. Sección A-B *de la nave de la iglesia. El gran arco* G *queda oculto a la vista por las bóvedas.*

1ᵇ. Planta del Panteón.

El basamento inferior de la cúpula abarca el ancho total de los brazos de la cruz; está apoyado sobre cuatro enormes arcos en forma de catenaria tendidos por encima de las bóvedas de la iglesia, de manera que desde el suelo no son visibles. Sus arranques apoyan contra los muros exteriores de la iglesia, que constituyen un sólido contrarresto (Lám. 113, figs. 2, 3).

La cúpula descansa mediante pechinas en los cuatro pilares torales; cada pilar soporta un peso de 3.647.000 kg.

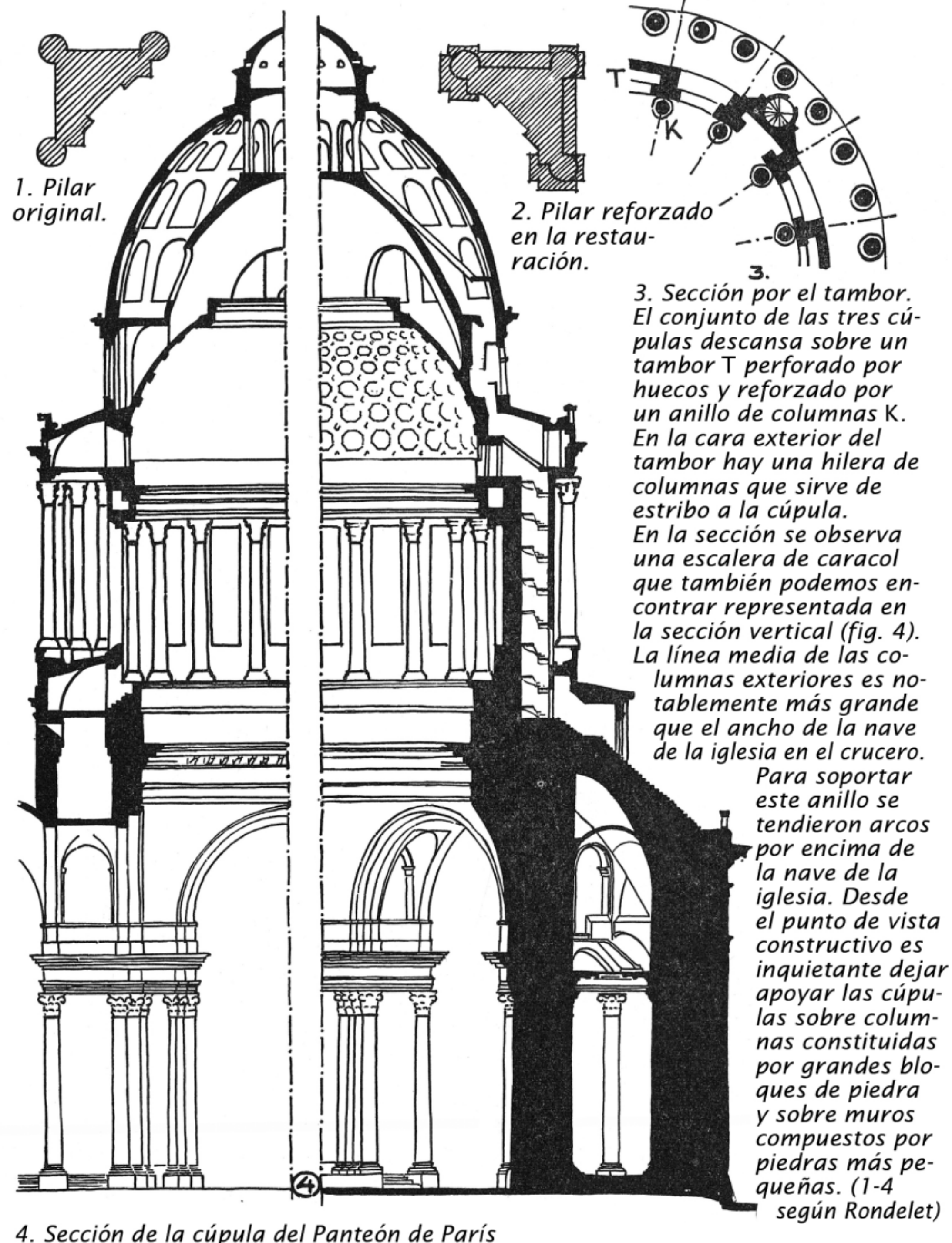
Patte dijo que los pilares eran demasiado débiles, contra lo que Soufflot se defendió, e incluso quiso hacer una apuesta. Sin embargo, mediando el tiempo la razón estuvo de parte de Patte.

A pesar de los fallos, la construcción es una obra maestra. Según Rondelet la mayoría de sus defectos deben atribuirse al escaso esmero durante la ejecución.

Los fallos son principalmente los siguientes:

– durante la construcción de los cimientos se descubrió que existían varios pozos con una profundidad de 25 m y que habían sido usados para la obtención de arcilla para alfarería. Estos pozos fueron rellenados con arena por Soufflot. Al elevarse la construcción a su máxima altura se produjeron asientos diferenciales.
– la estereotomía de los pilares era aparentemente muy buena, pues presentaba hacia el exterior juntas muy finas. Sin embargo, los lechos presentaban un rehundido en su parte central, formando la junta visible una estrecha banda perimetral. Los huecos producidos por los rehundidos se rellenaron en parte con piedra fragmentada sin mortero. Por consiguiente, las piedras contactaban unas encima de otras solamente en la estrecha banda perimetral. El mortero no era por otra parte de excelente calidad.
– el tambor sobre el que descansaba la cúpula está, en parte, en voladizo. Este tambor está perforado por ventanas y rodeado por un anillo de columnas. Por el apoyo heterogéneo y las cargas excéntricas existe peligro para la estabilidad (Lám. 114, fig. 4).
– durante la ejecución, los andamios se cargaron con grandes masas de materiales y con el peso de muchos operarios, ocasionándose vibraciones.

LÁMINA 114. SECCIÓN Y DETALLES DE LA CÚPULA DEL PANTEÓN DE PARÍS



1. Pilar original.

2. Pilar reforzado en la restauración.

3. Sección por el tambor. El conjunto de las tres cúpulas descansa sobre un tambor T perforado por huecos y reforzado por un anillo de columnas K. En la cara exterior del tambor hay una hilera de columnas que sirve de estribo a la cúpula. En la sección se observa una escalera de caracol que también podemos encontrar representada en la sección vertical (fig. 4). La línea media de las columnas exteriores es notablemente más grande que el ancho de la nave de la iglesia en el crucero. Para soportar este anillo se tendieron arcos por encima de la nave de la iglesia. Desde el punto de vista constructivo es inquietante dejar apoyar las cúpulas sobre columnas constituidas por grandes bloques de piedra y sobre muros compuestos por piedras más pequeñas. (1-4 según Rondelet)

4. Sección de la cúpula del Panteón de París
La sección izquierda está dada por el eje de la iglesia; la derecha por la diagonal. Evidentemente, Soufflot tenía la intención de disminuir todo lo posible el peso de las cúpulas mediante la colocación de nichos, aberturas y casetones.

– Soufflot mandó suprimir las esperas de las pechinas que su tío había dejado para los relieves y molduras. Esto se hizo violentamente y con fuertes golpes y sacudidas que agrietaron los defectuosamente ejecutados pilares.

Todos estos errores fueron la causa de los daños existentes.

En lo que concierne a las grietas de los pilares, cuando éstas se hicieron cada vez mayores, se nombraron diversas comisiones para iniciar una investigación. Rondelet manifestó en 1796 su opinión de que los pilares tenían que rehacerse. Esto hacía que durante la ejecución fuese necesario un fuerte apoyo de la cúpula. Después de un detallado estudio del que resultó que el estado de los pilares era mucho peor del supuesto originalmente, la comisión estatal se inclinó hacia su punto de vista. En 1798 Rondelet recibió el encargo de realizar este difícil trabajo, uno de los mayores cometidos que haya recibido nunca un arquitecto.

Las estructuras de cimbrado y arriostramiento de madera que proyectó y ejecutó son extraordinariamente interesantes y están descritas en su obra *L'art de bâtir*.

La cúpula permaneció sólida e intacta a pesar del asiento de los pilares. Rondelet pensaba que esto se debía a su buena construcción.

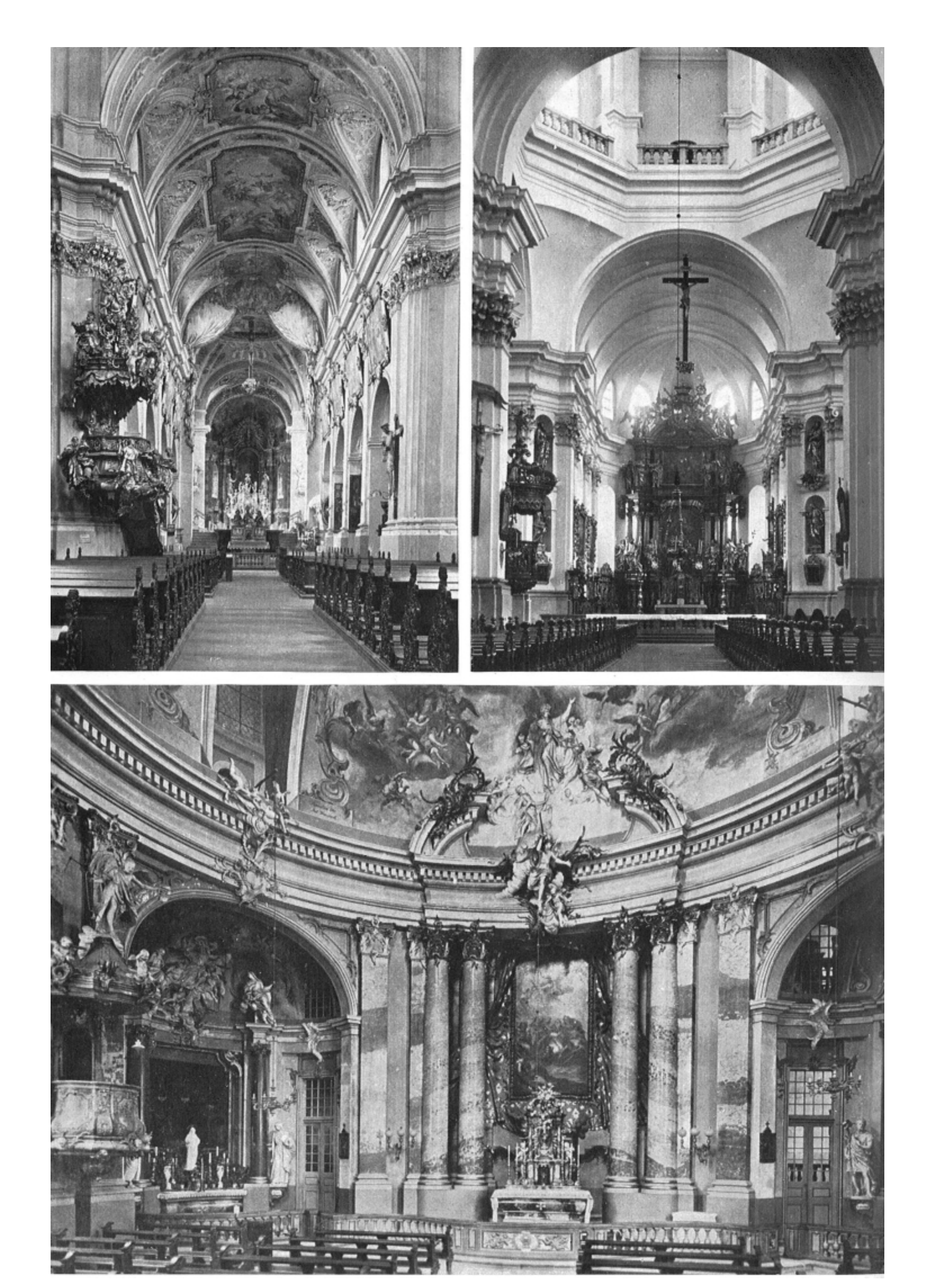
Los duros bloques de piedra se colocaron con plomo entre las juntas; éste se aplasta y origina un reparto uniforme de las tensiones. Reforzó los pilares, para lo que el mortero se mezcló con polvo de ladrillo y cada piedra se asentó completamente en el mortero de manera que en las juntas se obtuvo una capa fina y constante que aseguró un igual reparto de la presión, no permitiendo que ningún material duro estuviera uno sobre el otro directamente en contacto. Las piedras se unieron unas con otras mediante grapas de hierro pintadas previamente.

En 1806 la iglesia estuvo otra vez disponible para el culto. La retirada de la cimbra de los arcos y demás andamiajes, que expuso la fábrica a diversas sacudidas, no produjo ninguna grieta.

La cúpula, que incluida la linterna tiene una altura de 102 m, está hoy en día, después de siglo y medio, firme y sólida, en perfecto estado para desafiar las inclemencias del tiempo todavía durante muchos siglos.

Arriba. Bóveda plana en la capilla bautismal de la iglesia católica de Goirle. Arquitecto C. de Bever (Foto J. d'O-liveira)

Abajo. Lunetos en bóveda de cañón con juntas horizontales y ladrillos cortados. Arquitecto C. M. van Moosel

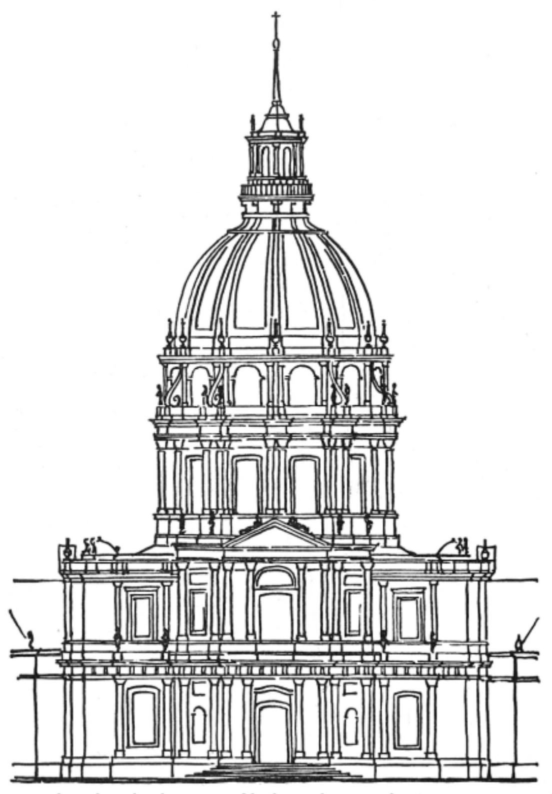


Arriba izquierda. Bóveda con lunetos sobre la bóveda central del Neumünster de Würzburg (1715-1730). Arquitecto Jos. Greising

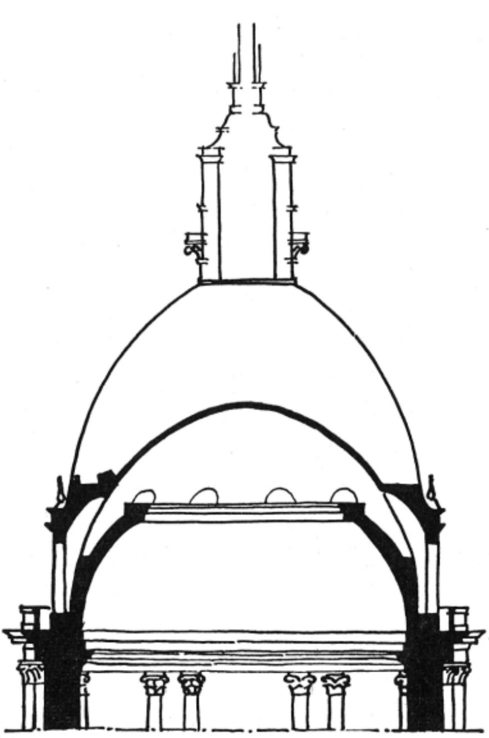
Arriba derecha. Iglesia Stift Haug de Würzburg (1670-1691). Sobre el crucero hay una cúpula octogonal elevada sobre pechinas. Arquitecto A. Petrini

Abajo. Bóveda de la iglesia de S. Clemente de Münster (Wesfalia) (1774-1753). Arquitecto J. K. Schlaun

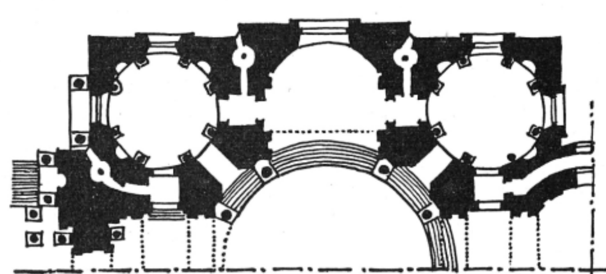
LÁMINA 115. CONSTRUCCIÓN DE LA CÚPULA DE LOS INVALIDOS DE PARÍS



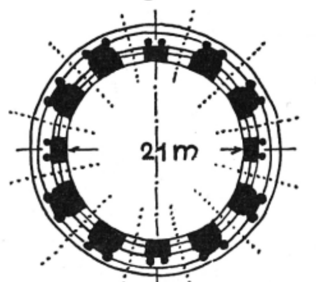
1. Cúpula de los inválidos de París (1675-1706). Arquitecto Jules Hardouin-Mansart. (según Geymüller).



2. Sección de las cáscaras de la cúpula. La inferior es de forma esférica; la superior oval (según Durm).



1ª. Planta (según Geymüller).



3. Sección por el tambor.

1. La planta está formada por un gran cuadrado con una cruz griega inscrita. Mansart resolvió el problema del edificio centralizado disponiendo una gran cantidad de material en los muros y pilares. La proporción de superficie en muros y pilares en relación al espacio libre es de 2/7; en San Pedro de Roma 1/4; en S. Pablo de Londres menos de 1/4; en el Panteón de París 1/7. Según el profesor Brinckmann, el arquitecto utilizó un módulo dimensional para las principales partes del edificio. La primera cúpula es de piedra, la segunda de ladrillo, con un espesor de 0,38 m, la tercera, alta e imponente, es de madera. El contrarresto del tambor se realiza mediante parejas de columnas adosadas muy sobresalientes. Desde el punto de vista estático, este contrarresto no es elegante. Por lo demás, desde el exterior la imagen de la cúpula es potente y grandiosa.

4.7 La construcción abovedada en nuestro tiempo

La vuelta al sistema constructivo gótico

El crecimiento del neogótico estuvo asociado en Europa occidental con un renovado florecimiento de la construcción abovedada.

En nuestro país, bajo la dirección del maestro P. Cuypers, muchos arquitectos neogóticos llegaron a ser competentes constructores de bóvedas, capacitándose sobre todo con la construcción de las numerosas iglesias erigidas en el pasado siglo diecinueve.

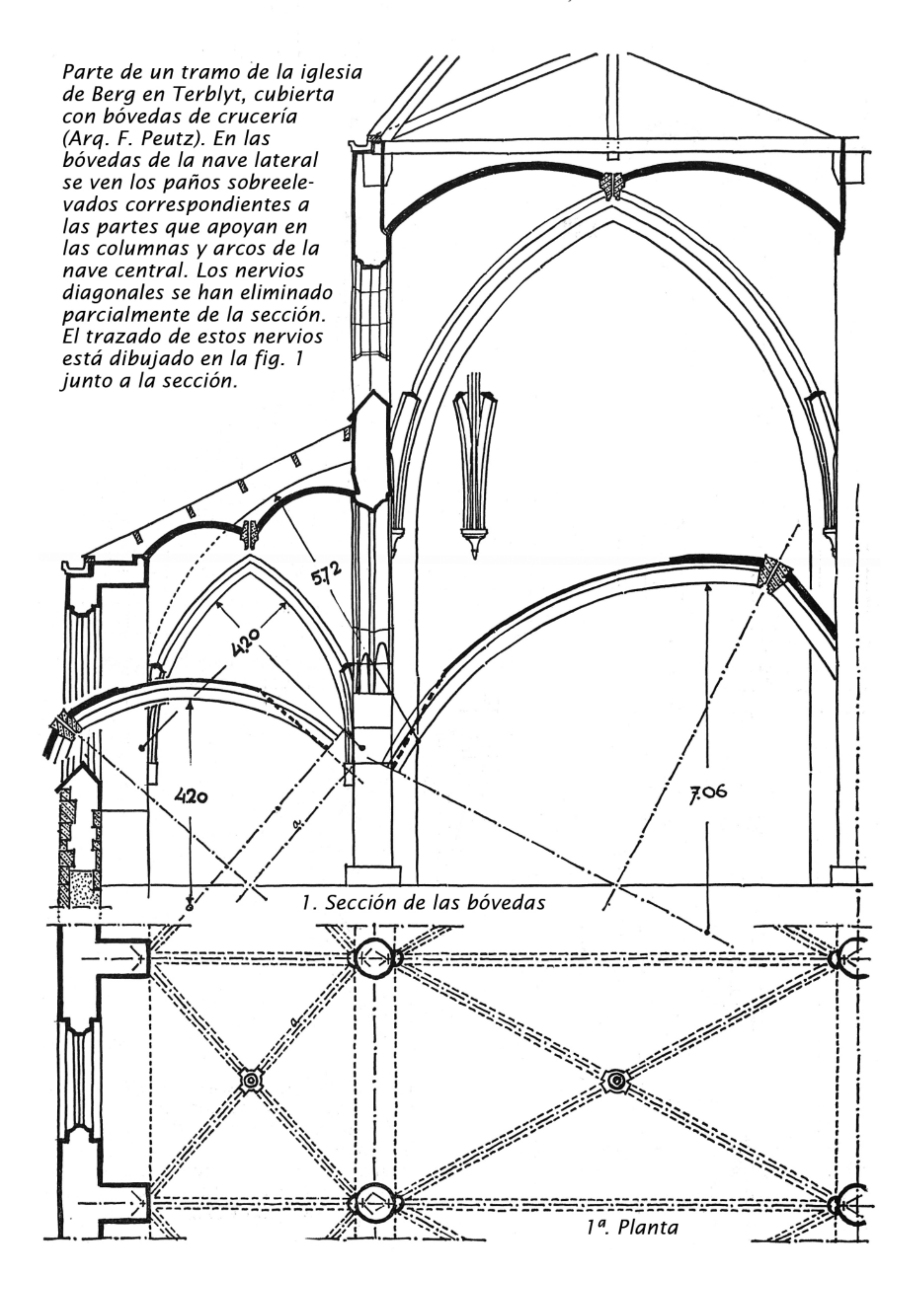
Sin embargo, apenas se añadieron nuevos hallazgos al rico arte abovedado gótico. Lo que sí hubo en la época moderna fue un anhelo general por construir las bóvedas lo más ligeras que fuera posible; las circunstancias económicas lo exigieron.

Expertos constructores de bóvedas como P. Cuypers, A. Teepe, J. Cuypers, Jan Stuyt, W. te Riele y otros, alcanzaron con sus estructuras abovedadas un máximo de ligereza. Hay que decir que, tuvieron más oportunidades en cuanto al material a su disposición, mortero y ladrillo, que los antiguos constructores de bóvedas. Los fabricantes de ladrillos suministraron ladrillos moldurados y aplantillados a medida, según dibujos; para la plementería podían usarse ladrillos ligeros de escorias, menos pesados que el agua; para los nervios, ladrillos bien cocidos con o sin molduras. Los morteros de endurecimiento rápido, que junto con los ladrillos de alta cocción dan gran monolitismo a las bóvedas, hicieron posible una rápida ejecución, aunque hubo que aceptar que la acústica se resintiera.

Antiguamente, la tarea de cortar y perfilar ladrillos pertenecía a los albañiles, y se hacía en los periodos en que no se podía trabajar a pie de obra, es decir con lluvias o heladas.

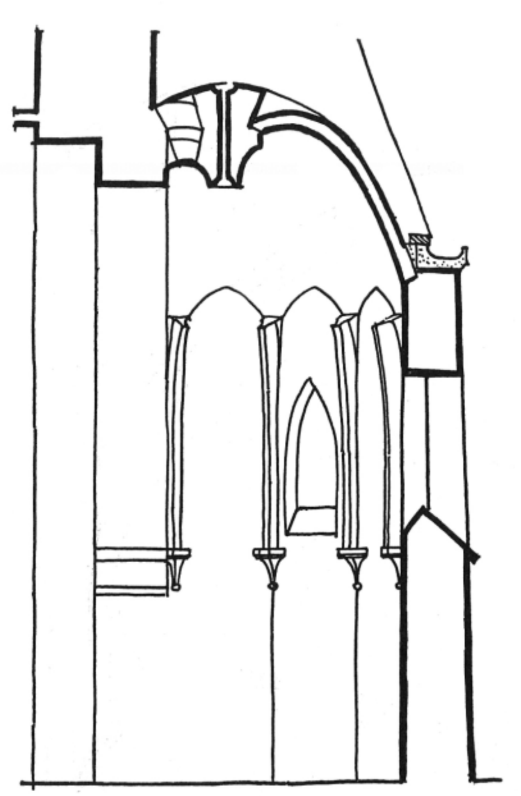
En las bóvedas modernas, en el aspecto estético se perdió algo del encanto especial que poseían las medievales. Los tersos, ladrillos fabricados a máquina, los angulosos perfiles (la mayoría de las veces sin sensibilidad), así como la insulsa, directa, exacta rectilineidad de las juntas, sustrajeron a la fábrica de una buena parte de su carácter, que en gran medida se debía al antiguo trabajo manual.

LÁMINA 116. BÓVEDA DE CRUCERIA MODERNA, INSPIRADA EN EL GÓTICO

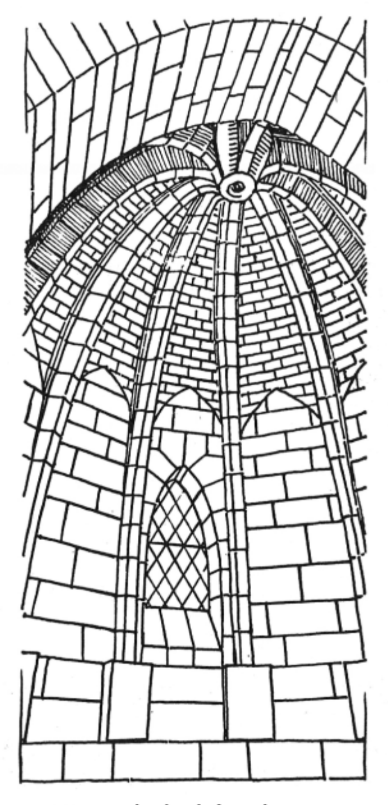


Parte de un tramo de la iglesia de Berg en Terblyt, cubierta con bóvedas de crucería (Arq. F. Peutz). En las bóvedas de la nave lateral se ven los paños sobreelevados correspondientes a las partes que apoyan en las columnas y arcos de la nave central. Los nervios diagonales se han eliminado parcialmente de la sección. El trazado de estos nervios está dibujado en la fig. 1 junto a la sección.

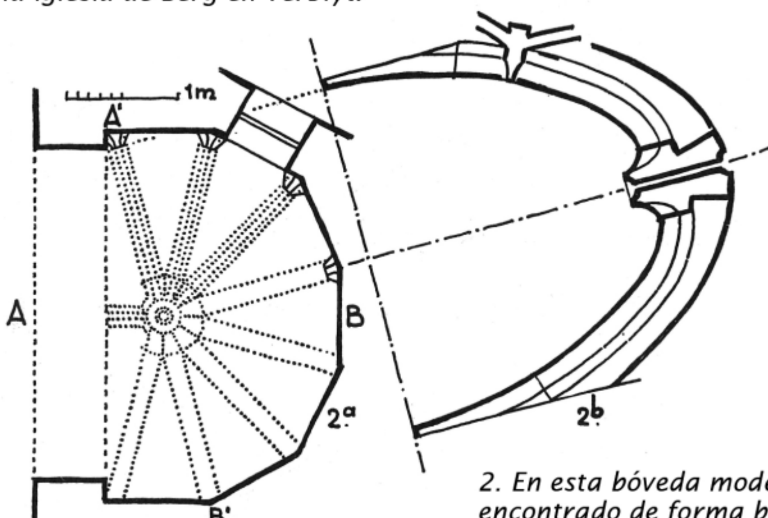
LÁMINA 117. BÓVEDA NERVADA MODERNA DE INSPIRACIÓN GÓTICA, REALIZADA EN PIEDRA



1. Construcción de una bóveda nervada con clave pasante en la capilla bautismal de la iglesia de Berg en Terblyt.



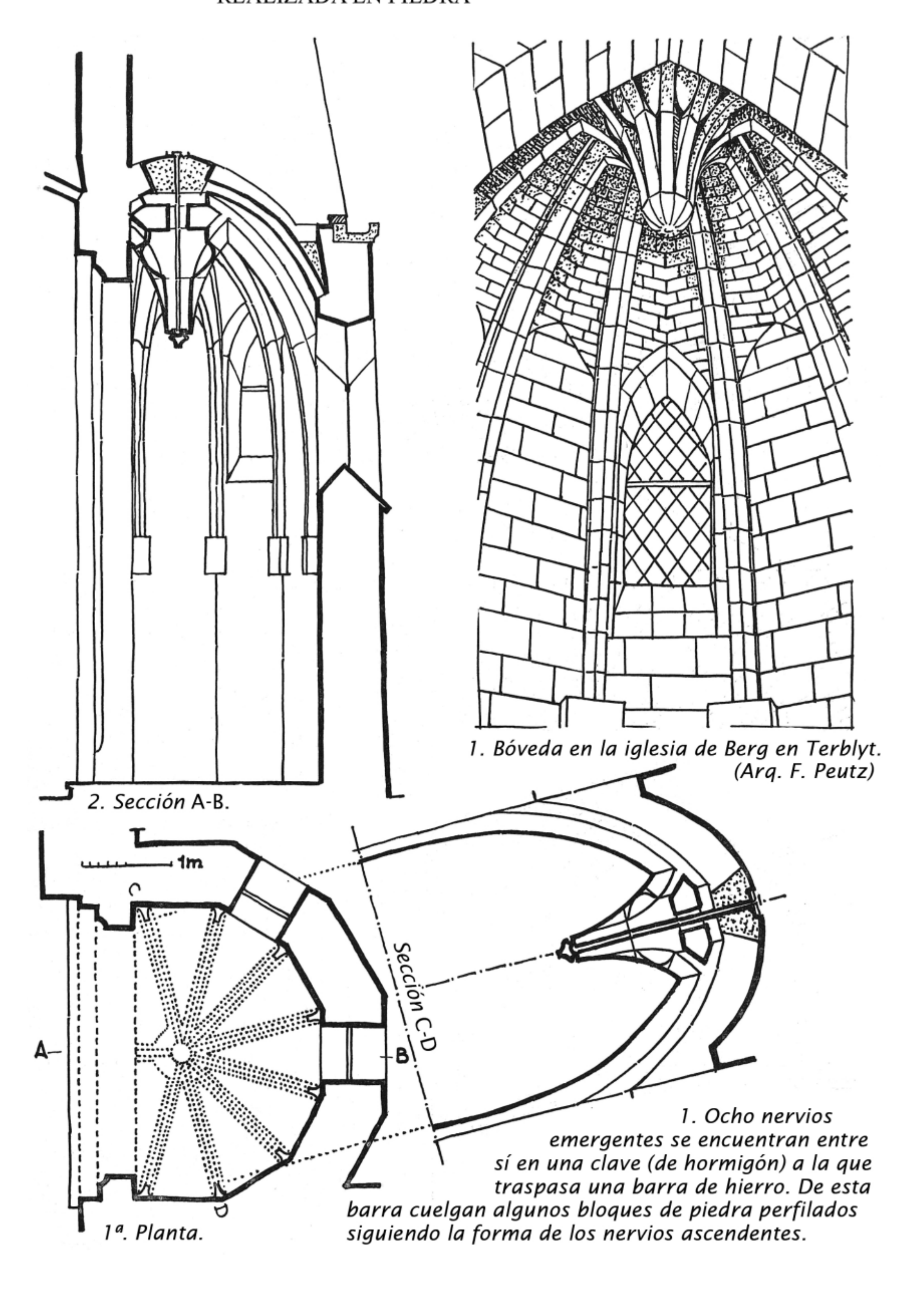
2. Vista de la bóveda. (Arquitecto: F. Peutz)



2ª. Planta de la bóveda
2ᵇ. Sección de la bóveda por el nervio A'-B'.

2. En esta bóveda moderna se ha encontrado de forma bella y original una solución para la colocación de la iluminación eléctrica. La clave está taladrada; la lámpara cuelga de una barra introducida por el agujero.

LÁMINA 118. BÓVEDA NERVADA MODERNA DE INSPIRACIÓN GÓTICA, REALIZADA EN PIEDRA



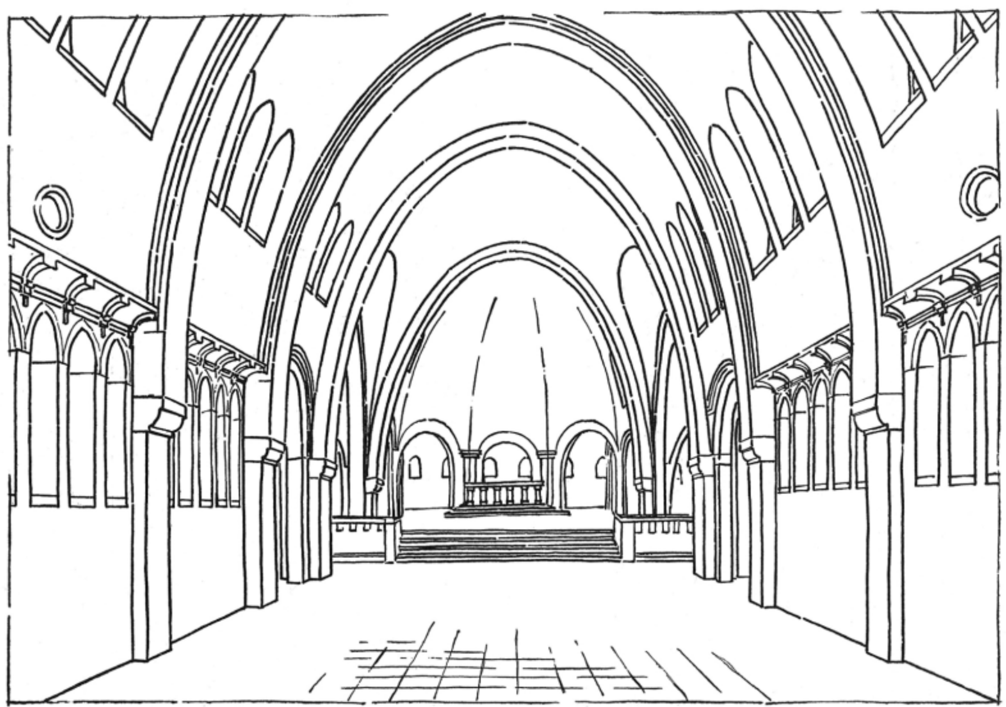
1. Bóveda en la iglesia de Berg en Terblyt. (Arq. F. Peutz)

2. Sección A-B.

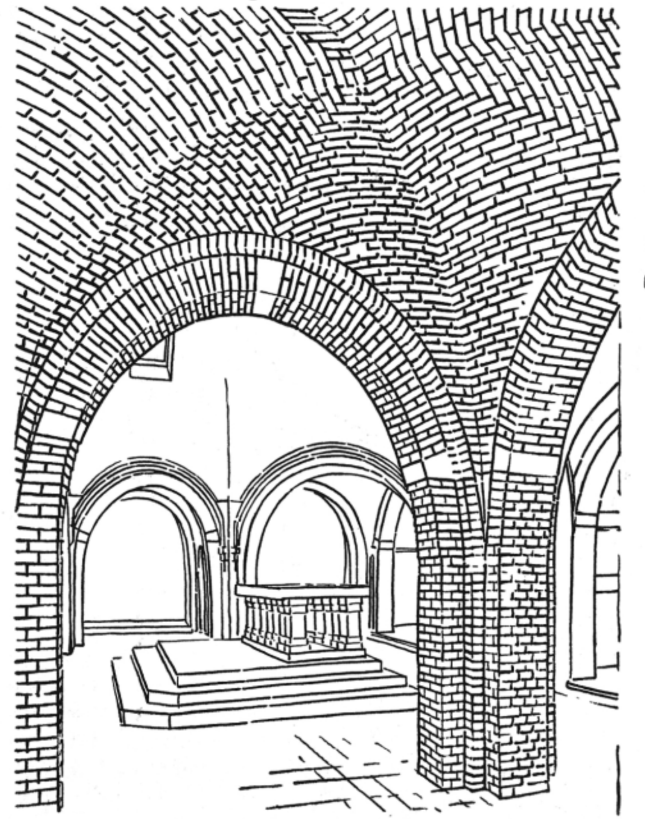
1ª. Planta.

1. Ocho nervios emergentes se encuentran entre sí en una clave (de hormigón) a la que traspasa una barra de hierro. De esta barra cuelgan algunos bloques de piedra perfilados siguiendo la forma de los nervios ascendentes.

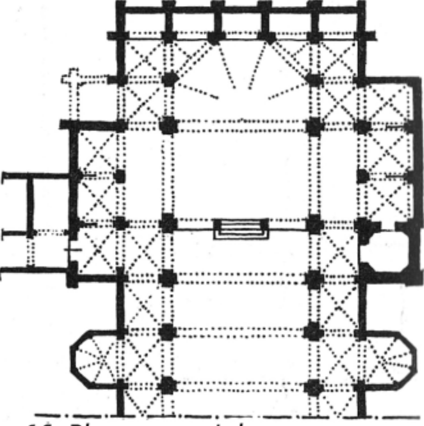
LÁMINA 119. BÓVEDAS DE LADRILLO MODERNAS. CÚPULA CON BÓVEDAS DE CAÑÓN; BÓVEDA DE ARISTA



1. Interior de la iglesia de la abadía benedictina de Tegelen.



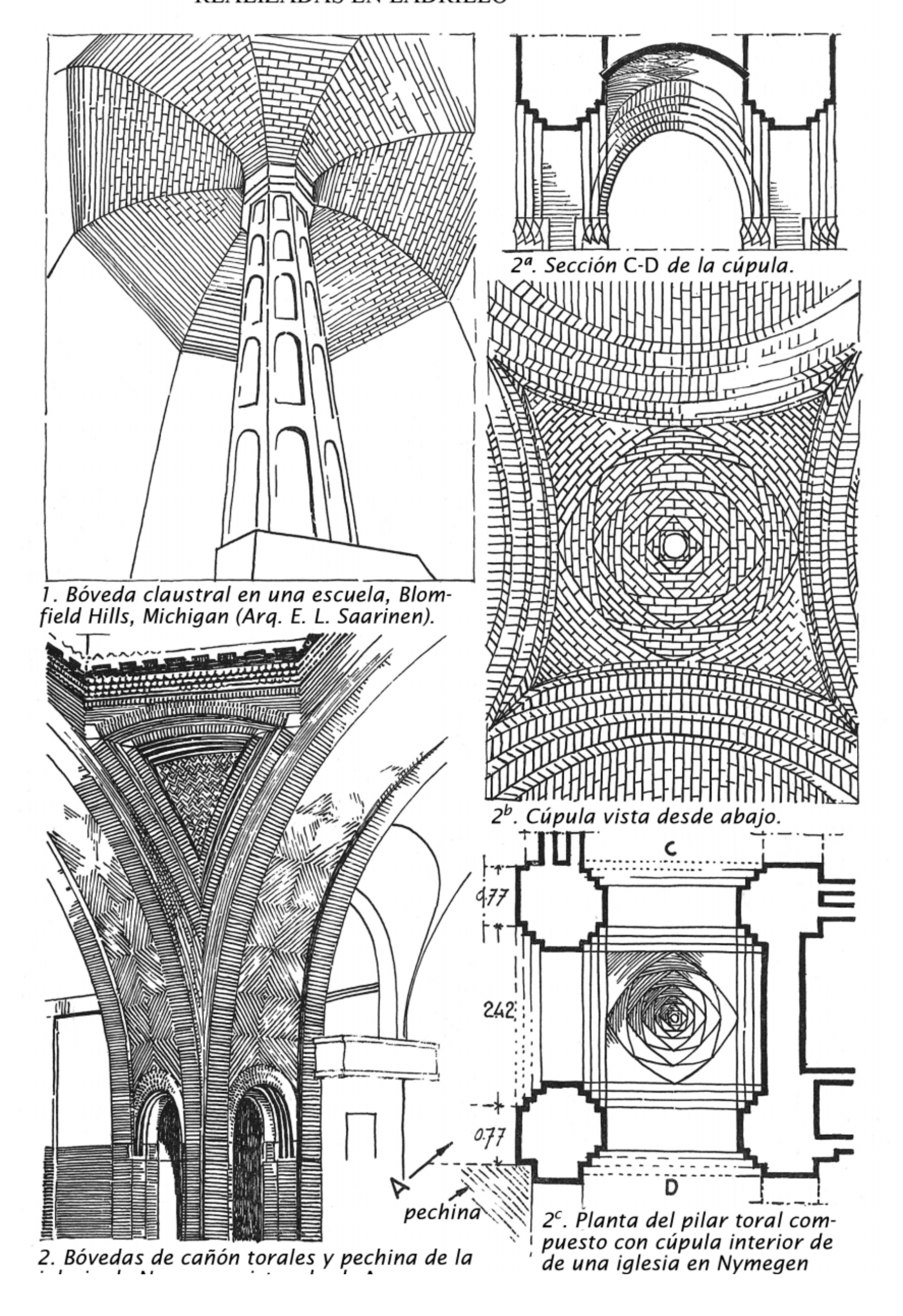
2. Vista sobre el altar desde la nave lateral.



1ª. Planta parcial.

La nave principal de la iglesia está cubierta con una bóveda de cañón. Sobre el crucero se asienta una cúpula. El ábside está cubierto por una semi-cúpula con aristas salientes que desaparecen en la parte inferior. Las naves laterales están cubiertas con bóvedas de aristas muy pronunciadas que exigen una cuidada ejecución.
(Arq: H. Stoks; bóvedas de H. Thunnissen).

LÁMINA 120. BÓVEDA EN RINCÓN DE CLAUSTRO, CÚPULA Y PECHINA REALIZADAS EN LADRILLO



1. Bóveda claustral en una escuela, Blomfield Hills, Michigan (Arq. E. L. Saarinen).

2ª. Sección C-D de la cúpula.

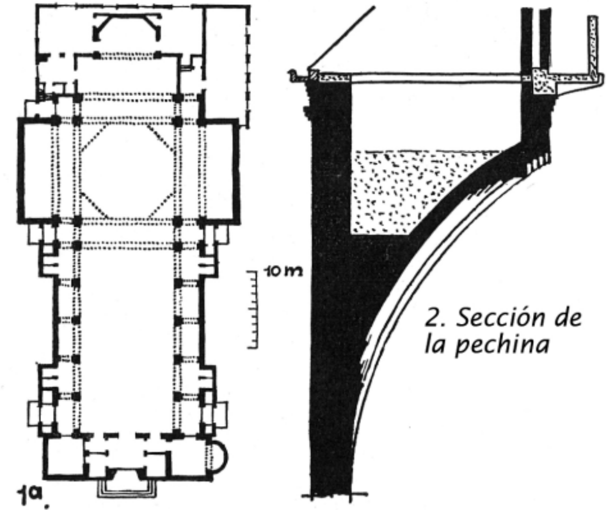
2ᵇ. Cúpula vista desde abajo.

2ᶜ. Planta del pilar toral compuesto con cúpula interior de de una iglesia en Nymegen

2. Bóvedas de cañón torales y pechina de la

LÁMINA 121. COMBINACIÓN DE BÓVEDAS DE CAÑÓN CON PECHINAS. ÁBSIDE EN FORMA DE SEMICÚPULA

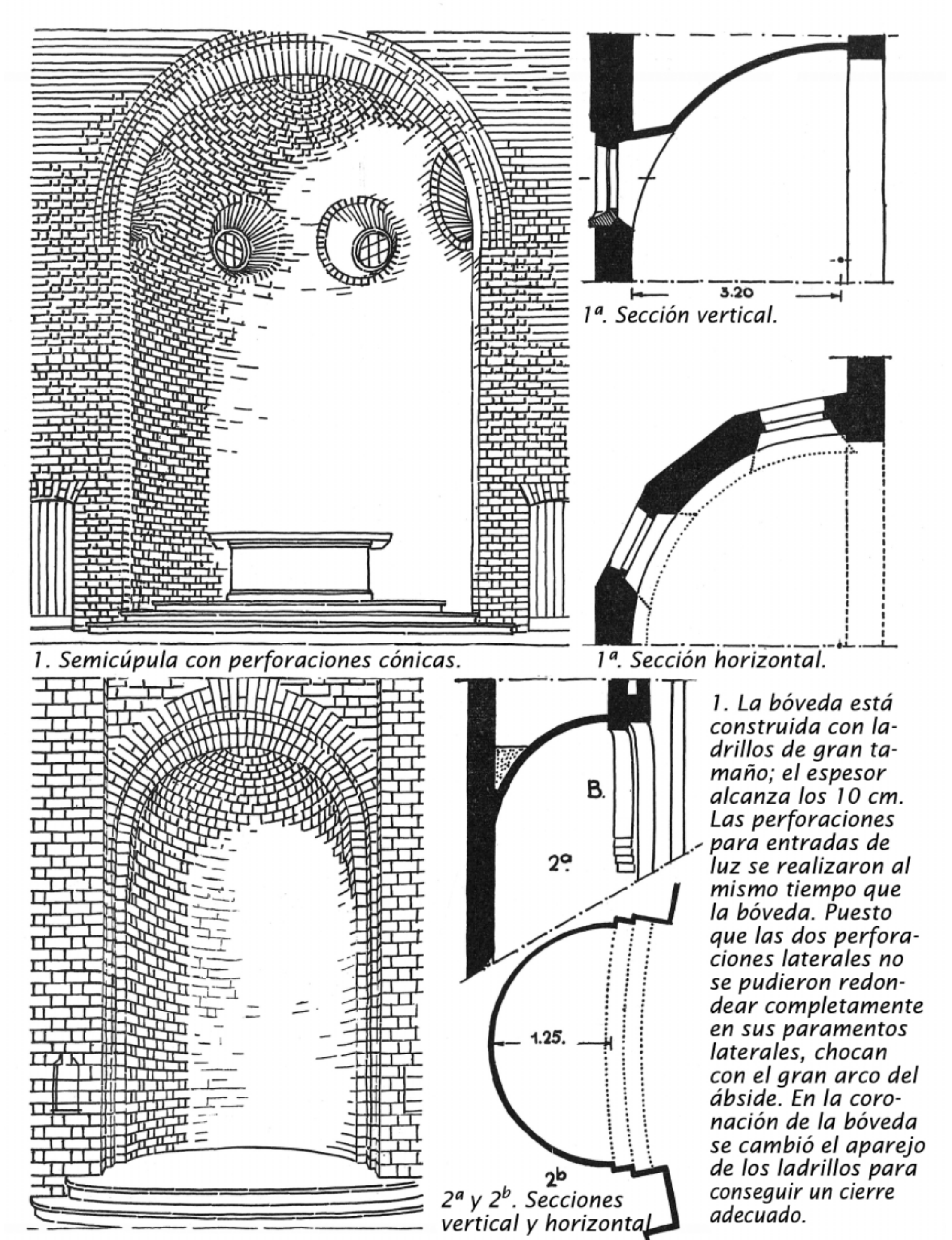
1. Vista interior y 1ª planta de una iglesia en Nymegen. Arquitecto H. Thunnissen.



2. Sección de la pechina

La cúpula sobre el crucero está soportada por cuatro arcos torales con pechinas. El balcón de la imposta, de hormigón armado, forma un sólido zuncho anular. Los arcos forman parte de una bóveda de cañón de cuatro metros de ancho y están soportados por pilares y muros que, además, sirven de contrarresto al sistema de bóvedas. En el arranque, la sección horizontal de la bóveda de cañón es rectangular, más arriba arqueada. Para la ejecución de la pechina se hizo una maqueta de arcilla a escala. La bóveda del ábside es una semicúpula de 0,11 m de espesor.

LÁMINA 122. BÓVEDAS EN FORMA DE SEMICÚPULA EJECUTADAS EN LADRILLO



1. Semicúpula con perforaciones cónicas.

1ª. Sección vertical.

1ª. Sección horizontal.

2ª y 2b. Secciones vertical y horizontal.

1. La bóveda está construida con ladrillos de gran tamaño; el espesor alcanza los 10 cm. Las perforaciones para entradas de luz se realizaron al mismo tiempo que la bóveda. Puesto que las dos perforaciones laterales no se pudieron redondear completamente en sus paramentos laterales, chocan con el gran arco del ábside. En la coronación de la bóveda se cambió el aparejo de los ladrillos para conseguir un cierre adecuado.

2. Pequeña semicúpula. Para asegurar una buena unión de la cúpula se colocó un pequeño arquillo B. Debido al gran formato de los ladrillos (10 x 10 x 25 cm) la bóveda se realizó completamente con aparejo de tizones. Ambas bóvedas se rellenaron hasta 1/3 de la altura.
(Proyectista H. Thunnissen)

No obstante, algunos arquitectos emplearon para las bóvedas piezas realizadas a mano, que en nuestro país casi siempre fueron de ladrillo, y siguieron en la disposición de las juntas la manera medieval.

Desde un punto de vista estético, el apartamiento de la tradición resultó tener sus ventajas. Así, en los arquitectos modernos ya no se ve la acusada preferencia de los medievales por reforzar las bóvedas con nervios salientes que originaban la división de las superficies en pequeñas partes y que podían interferir en la tranquila contemplación de un espacio.

Preferentemente usaron bóvedas con pronunciadas aristas y una muy cuidadosa distribución de las juntas; a veces estas bóvedas se combinaron con paños abombados sin aristas con lo que tomaron un aspecto más o menos cupuliforme, formando superficies suaves y tranquilas (Lám. 119). Motivos antiguos como por ejemplo las claves pinjantes, recibieron un nuevo significado, ya que ofrecieron la oportunidad de colocar ornamentos ligeros (Lám. 118).

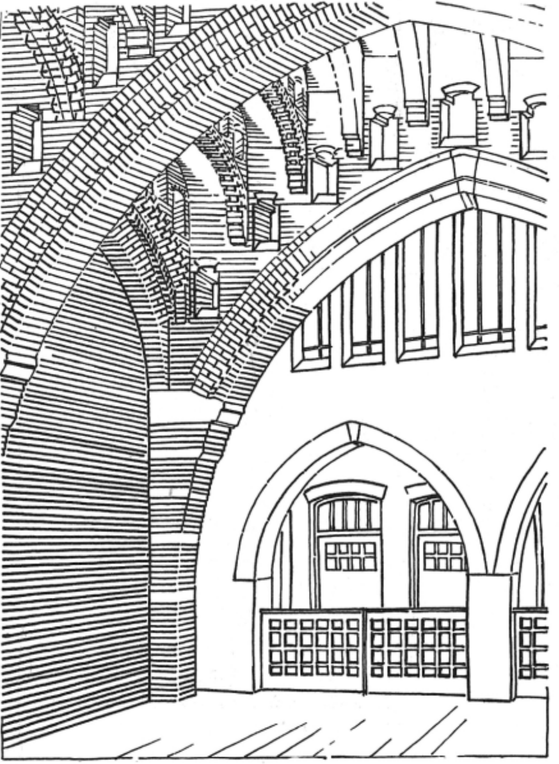
También a menudo los arcos, fueran de medio punto, apuntados o parabólicos, alcanzaron una importante función en el abovedamiento de grandes salas y espacios religiosos, convirtiéndose otra vez en soportes de las estructuras de techos y cubiertas, o sirviendo de apoyo a bóvedas y arcos menores (Láms. 123–124).

La construcción moderna de cúpulas

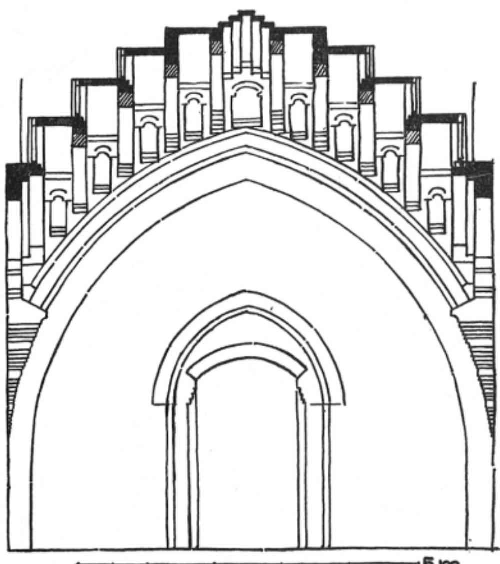
CÚPULAS GALLONADAS Y NERVADAS. INFLUENCIA BIZANTINA: En nuestro país, sobre todo en la arquitectura religiosa de los últimos decenios, se han construido estructuras con cúpulas en las que los arquitectos han profundizado en el estudio de los métodos bizantinos de contrarresto de la cúpula principal mediante nichos y bóvedas secundarias (Láms. 125–130).

También estudiaron la manera de realizar la transición de una planta cuadrada a una cúpula circular o poligonal. Esto se consiguió mediante voladizos y pechinas y los arquitectos trataron de resolver los distintos problemas según su manera propia, obteniéndose en muchos casos bellos resultados. Frecuentemente dispusieron doce columnas y pilares en un gran cuadrado, los unieron entre sí con arcos y, mediante el trazado de arcos oblicuos y la colocación de pequeños volados y pechinas, formaron una base circular para el tambor de la cúpula (Lám. 125).

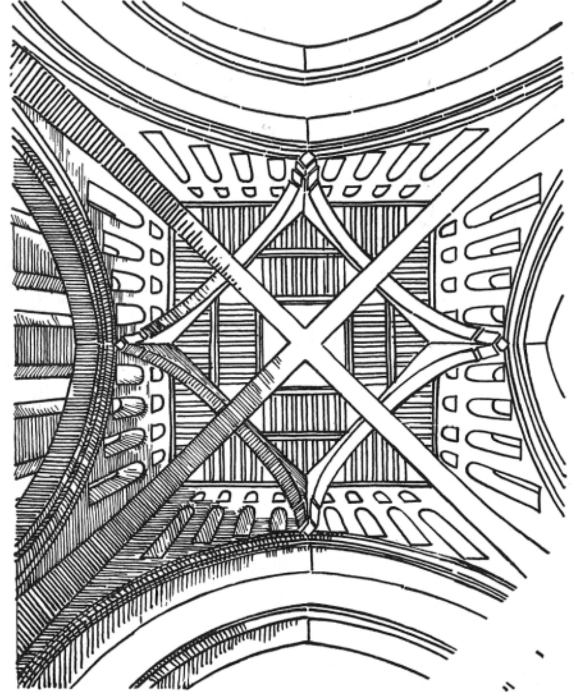
LÁMINA 123. COMBINACIONES DE ARCOS DE LADRILLO CON BÓVEDAS



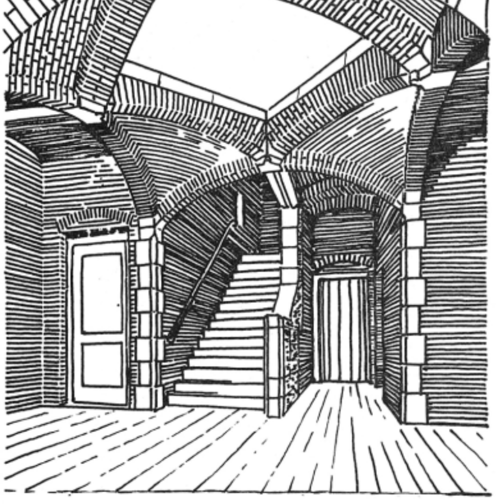
1. Estructura abovedada en la abadía de St. Paulus de Oosterhout.



1ª. Sección de la bóveda. El arranque de los arcos manifiesta una excelente inteligencia constructiva y estética. La iluminación del espacio se ha conseguido de una forma original. La arquitectura de ladrillo se presta en grado sumo para la realización de construcciones abovedadas (Arq. Dom. Paul Bellot).

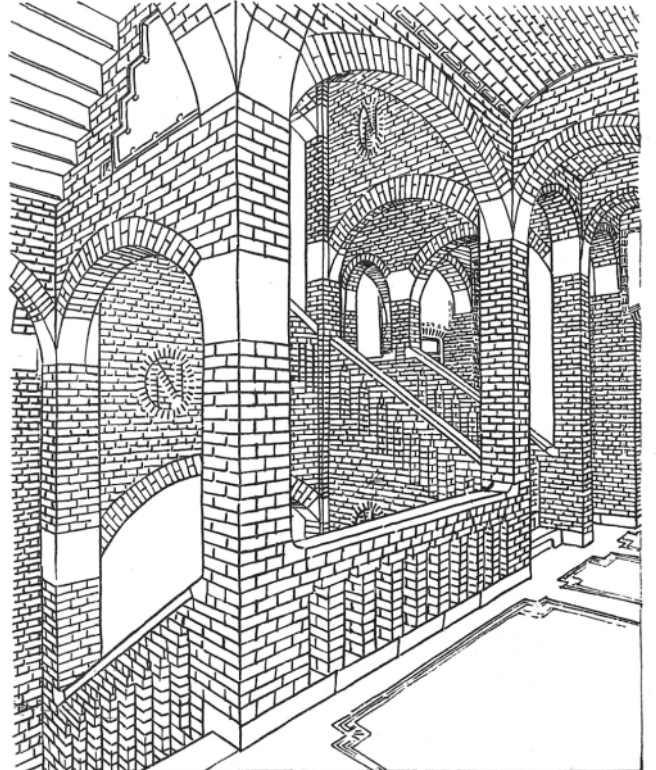


2. Estructura de arcos en la abadía benedictina de Quarr (Inglaterra). Arq. Dom. P. Bellot.

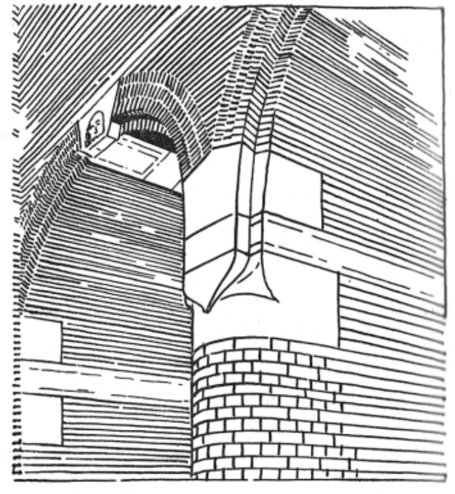


3. Vestíbulo en una villa en Schevenigen. La estructura de los arcos entrecruzados trae al recuerdo las construcciones abovedadas de Armenia. Este vestíbulo de pequeñas dimensiones alcanza un carácter monumental por el uso de las bóvedas (Arquitecto H. Berlage).

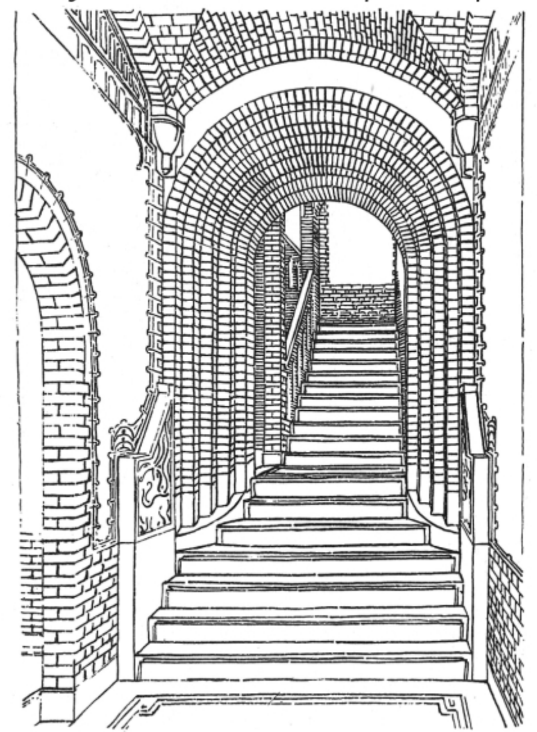
LÁMINA 124. CONSTRUCCIONES ARQUEADAS Y ABOVEDADAS. ARQ. H. P. BERLAGE



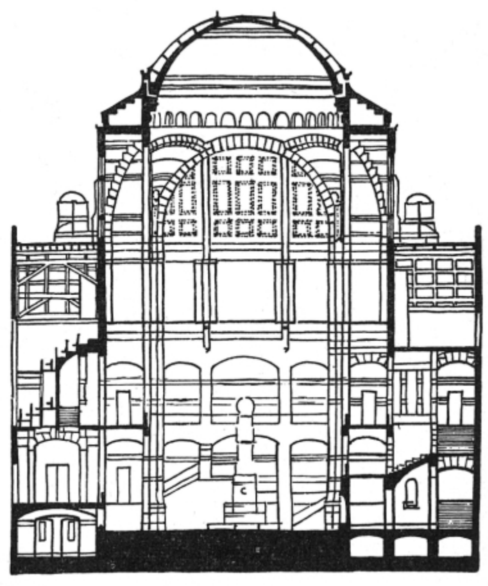
1. Caja de escalera en un edificio de oficinas en La Haya.



3. Bóveda de cañón en el edificio de la Bolsa de Ámsterdam. Berlage, el arquitecto de las estructuras aquí ilustradas, construyó preferentemente con ladrillo. En el arranque de los arcos y de las bóvedas empleó la piedra de una forma muy característica.

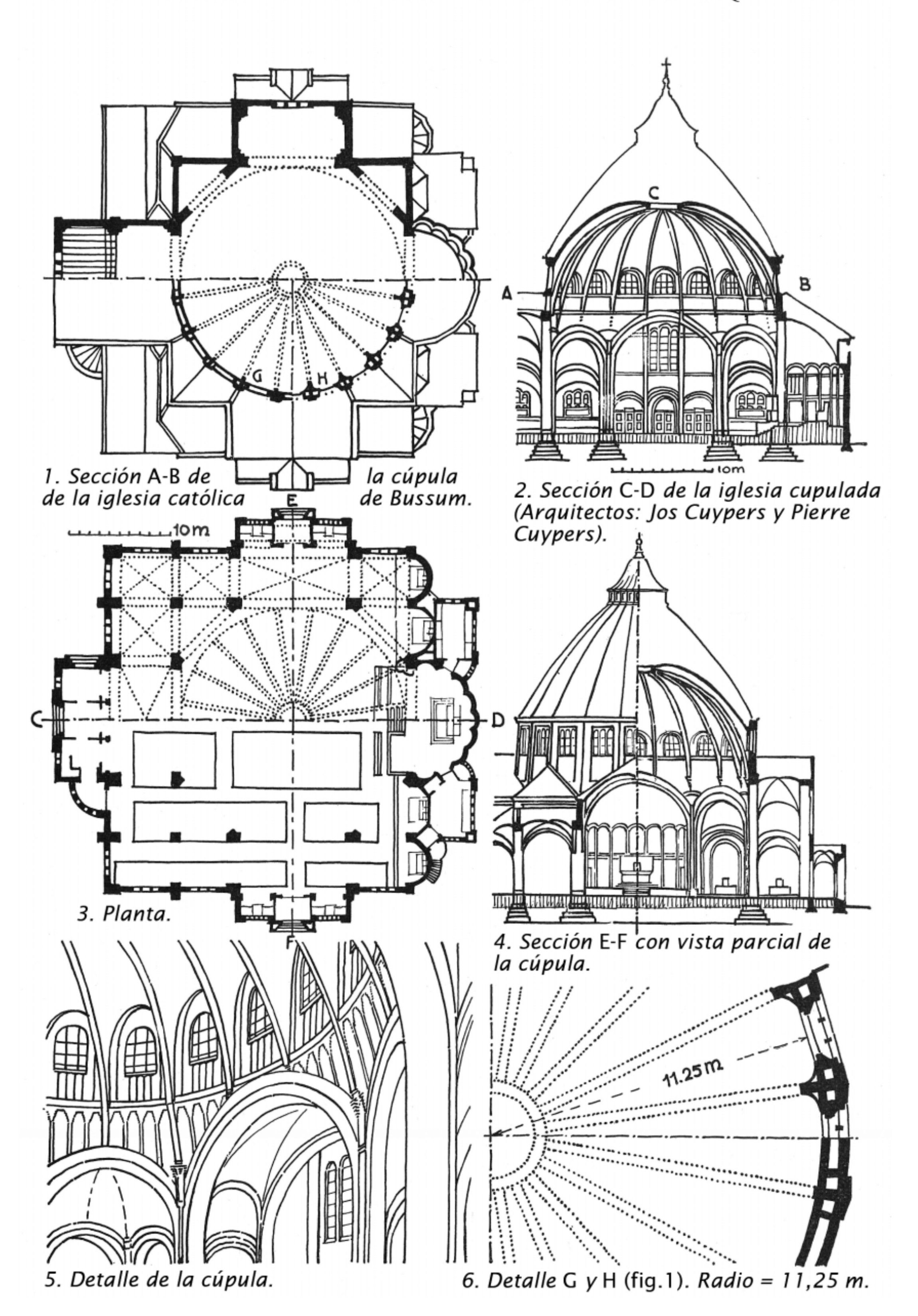


2. Escalera en un edificio de oficinas en la Haya.



4. Proyecto de H. P. Berlage para el Palacio de la Paz en el que una cúpula central sobre pechinas corona el monumental edificio.

LÁMINA 125. CÚPULA NERVADA DE GAJOS EN BUSSUM. ARQ. J. CUYPERS



1. Sección A-B de la cúpula de la iglesia católica de Bussum.

2. Sección C-D de la iglesia cupulada (Arquitectos: Jos Cuypers y Pierre Cuypers).

3. Planta.

4. Sección E-F con vista parcial de la cúpula.

5. Detalle de la cúpula.

6. Detalle G y H (fig.1). Radio = 11,25 m.

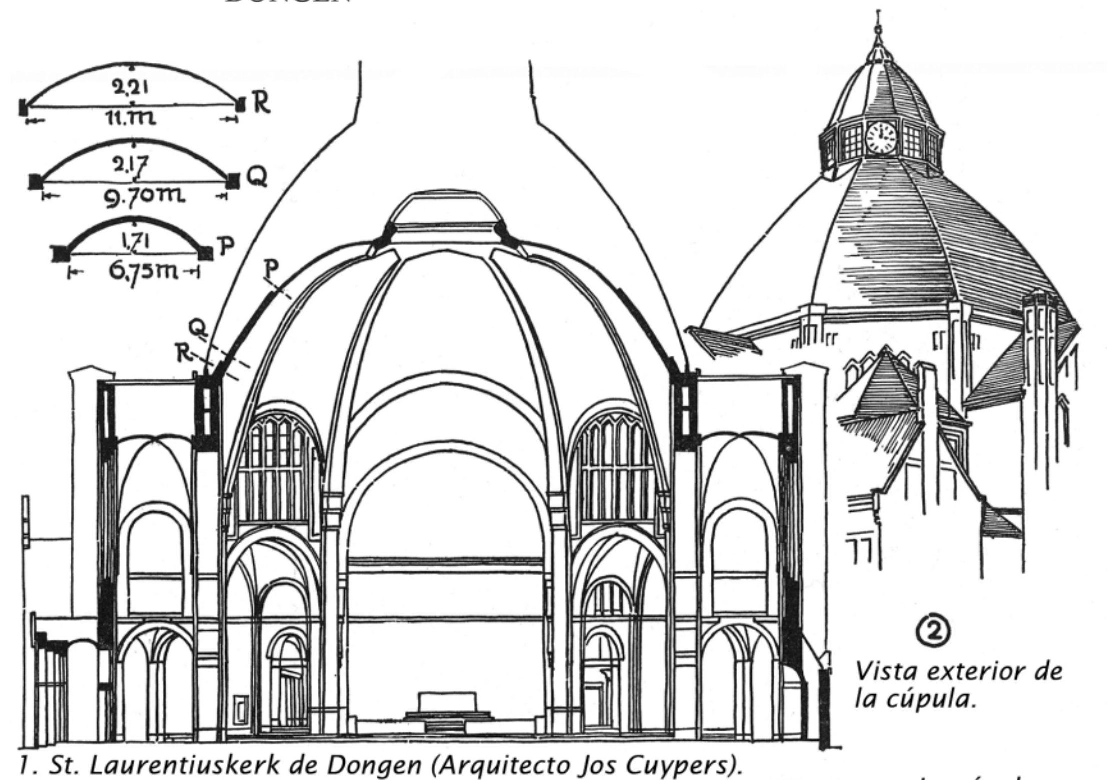
El contrarresto y equilibrio de este sistema de bóvedas fue realizado de forma magistral por arquitectos como J. Cuypers, P. Cuypers, Jan Stuyt, J.v.d.Valk y otros. Así mismo, fue de agradecer el uso que se hizo de zunchos de hormigón armado para neutralizar los empujes laterales; estos zunchos podían estar en la imposta o formando un canalón perimetral exterior. Un anillo de hormigón armado tiene propiedades especialmente buenas como medio auxiliar en la construcción de una bóveda; no sólo porque el hormigón armado es muy adecuado para la absorción de los esfuerzos de tracción, sino porque además, proporciona una firme cohesión a las construcciones de fábrica. El peligro de corrosión del hierro casi desaparece cuando se realiza una buena ejecución. Una desventaja es que una estructura de hormigón es indeformable y puede dar lugar a la aparición de grandes tensiones locales.

La mayoría de las veces se eligió una cúpula gallonada, formada por gajos provistos de fuertes nervios, sea en la parte interior o por el trasdós de la cúpula. En este último caso los nervios no son visibles desde el interior de la iglesia.

En una cúpula gallonada los nervios son los elementos portantes; los gajos abovedados tendidos entre ellos constituyen el relleno. Son realmente cúpulas construidas según el sistema estructural gótico.

Diferencia entre una cúpula gallonada o nervada y una verdadera cúpula de cáscara: Tal como más detalladamente se explicará en el análisis de las cúpulas, las fuerzas que por peso propio y sobrecarga actúan sobre una cúpula se pueden imaginar descompuestas en dos direcciones principales perpendiculares entre sí. Las fuerzas en la primera de ellas se dirigen según las tangentes a la cúpula, en la dirección de los meridianos; la magnitud aumenta a medida que se desciende. Son semejantes a las que actúan en un arco o en una bóveda de cañón y, por lo general, son fuerzas de compresión. (Para la estabilidad de las bóvedas deben ser fuerzas de compresión.) Las fuerzas en la segunda dirección actúan sobre secciones radiales; se trata de fuerzas anulares, que varían según la altura y pueden ser de tracción o compresión.

LÁMINA 126. CÚPULA OCTOGONAL SOBRE FUERTES NERVADURAS EN DONGEN



Vista exterior de la cúpula.

1. St. Laurentiuskerk de Dongen (Arquitecto Jos Cuypers).

0,77

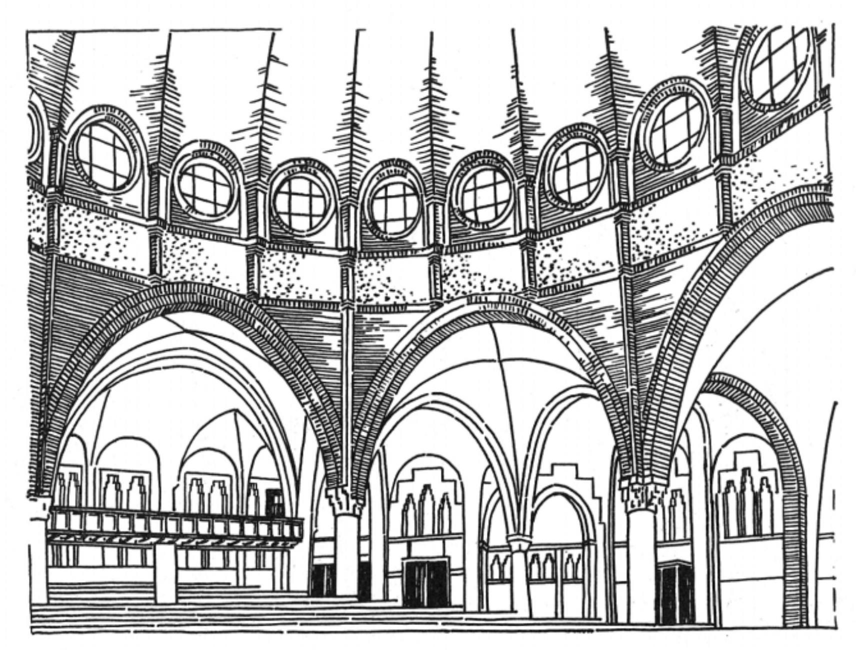
0,55

10m

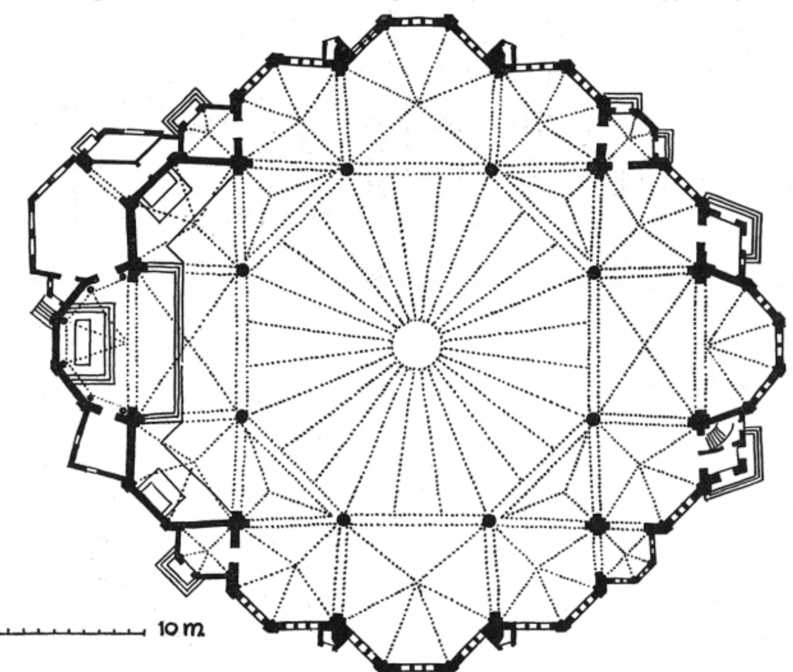
2ª. Planta.

La cúpula esta ejecutada en fábrica vista. Ocho arcos se juntan entre sí en un anillo de fábrica; entre ellos se han tendido bóvedas. El espesor de los paños varía de 0,22 a 0,11 m. Para cada espesor se ha elegido un tipo de ladrillo. Las transiciones están recubiertas con decoraciones pintadas con pintura de caseína. Zunchos anulares de hormigón armado absorben la mayor parte del empuje.

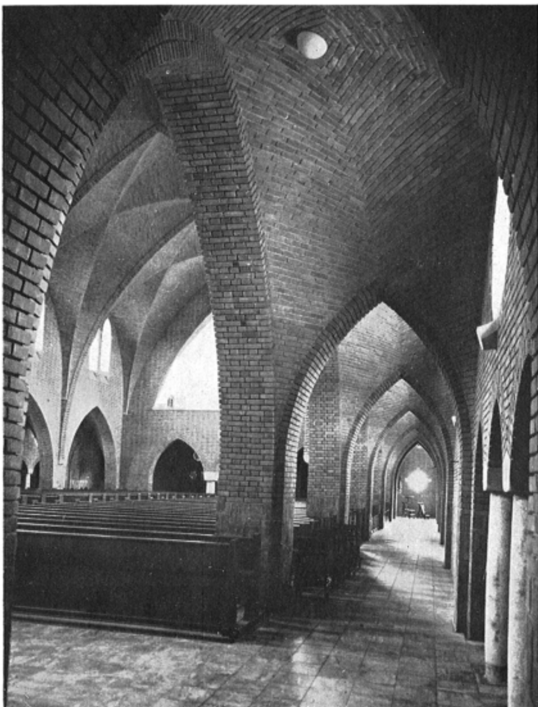
LÁMINA 127. CÚPULA GALLONADA EN BEVERWIJK. ARQ. J. CUYPERS

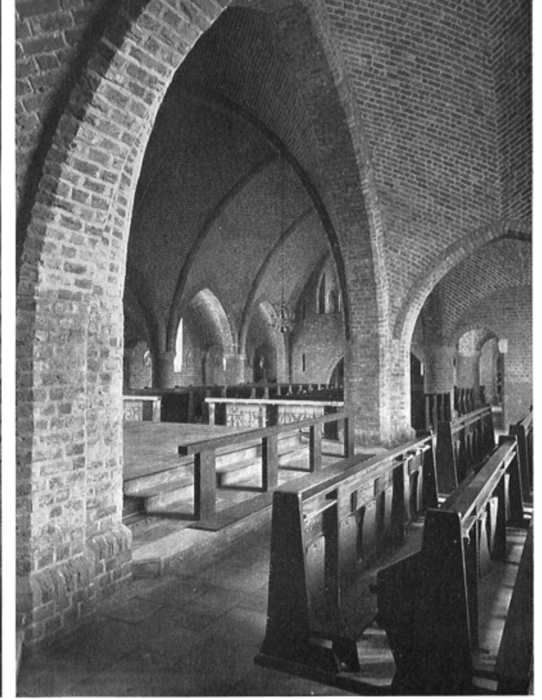


1. Interior de la iglesia católica de Beverwijk (Arquitectos: Jos Cuypers y Pierre Cuypers).



1ª. Planta de la iglesia.
La iglesia está cubierta con una cúpula gallonada que descansa en ocho columnas sobre las que se han tendido arcos. Contra el gran cuadrado central se ven en planta pequeñas capillas poligonales y anexos con pequeñas cúpulas que de ingeniosa manera aseguran un buen contrarresto. Se ha obtenido un interior con sorprendentes perspectivas, habiéndosele exigido también al arquitecto el cumplimiento de condiciones muy determinadas a efectos de conseguir así mismo un exterior bien logrado.

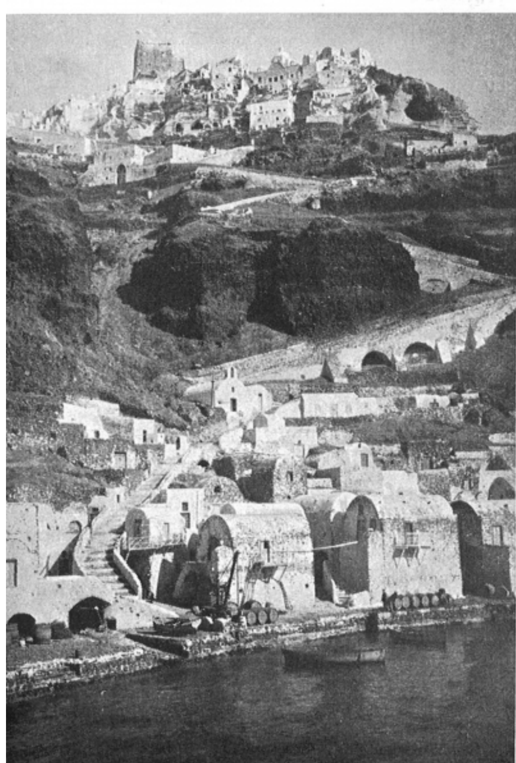




Arriba. Cúpula de cáscara en la iglesia de Hetloo. Arquitecto H.J.W. Thunnissen. *(foto Eva Besnyo)*

Abajo derecha. Interior de iglesia católica en Meghelen (Gelderland). Arquitecto J. Sluymer.

Abajo izquierda La nave principal de la iglesia está recubierta con bóvedas de aristas, las naves laterales con bóvedas de cañón abombadas. Arquitecto J. Sluymer.





Arriba. Casas en Marruecos cubiertas con bóvedas modernas

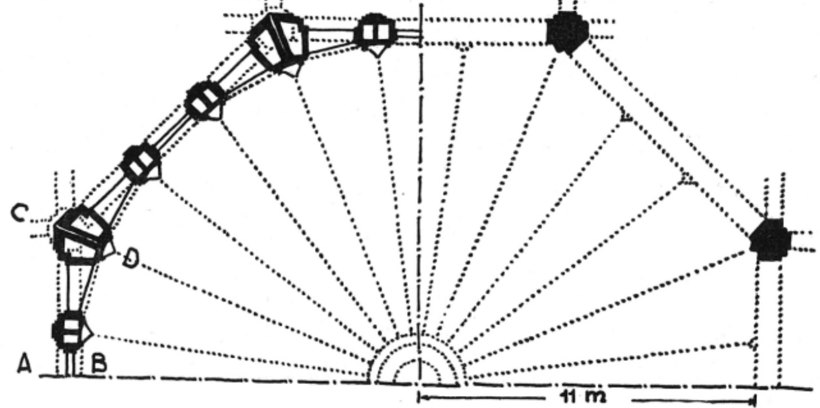
Abajo izquierda Casas en Santorini (Grecia) cubiertas con bóvedas antiguas

Abajo derecha. Construcción de las bóvedas de la foto de arriba

LÁMINA 128. CÚPULA GALLONADA EN BEVERWIJK. ARQ. J. CUYPERS

0.11m
0.18m
0.22m
E
H
K
H-K
10m
317
870
zuncho anular
pechina
F

1. Sección de la cúpula de la iglesia de Beverwijk; a la izquierda, por ventana de uno de los lados rectos; a la derecha, por uno de los ángulos. El canalón de hormigón armado asegura un buen zunchado en la parte superior.



2. Secciones horizontales; a la izquierda por E *(sobre las ventanas), a la derecha por* F*. En una cúpula gallonada la cúpula está dividida en diferentes paños que transmiten el peso a los nervios. Estos nervios están realizados en esta bóveda como arcos huecos. En la clave se reúnen con un fuerte anillo macizo de fábrica. En el arranque de la cúpula se ha colocado un zuncho de hormigón armado sobre el espesor del muro*

En una cúpula, la parte superior tiene tendencia a caer hacia abajo, mientras que la parte más baja por el contrario tiende a irse hacia fuera. Esto indica, por tanto, que las tensiones anulares en una cúpula no son en todas las secciones de la misma magnitud y naturaleza; en la parte alta de la cúpula actúan tensiones de compresión, mientras que en la parte baja son de tracción. Si la cúpula es semiesférica la separación se sitúa en un corte radial obtenido por el giro de una línea que pasa por el centro de la esfera formando un ángulo de unos 52° con el eje vertical (Lám. 139, fig. 8). Desde esta sección hasta la base, la cúpula debe estar en condiciones de absorber tensiones de tracción.

Esto se puede conseguir de diferentes maneras: mediante la colocación de zunchos anulares en torno a la cúpula, o regruesando la base, tal como por ejemplo se ve en las cúpulas hindúes.

Como alternativa, se puede también imaginar que la cúpula, suficientemente contrarrestada, está compuesta por diferentes arcos tan resistentes en la dirección de los meridianos como para que no sea necesario hacer uso del funcionamiento de cáscara, es decir, de la capacidad de absorber esfuerzos de tracción en la dirección radial.

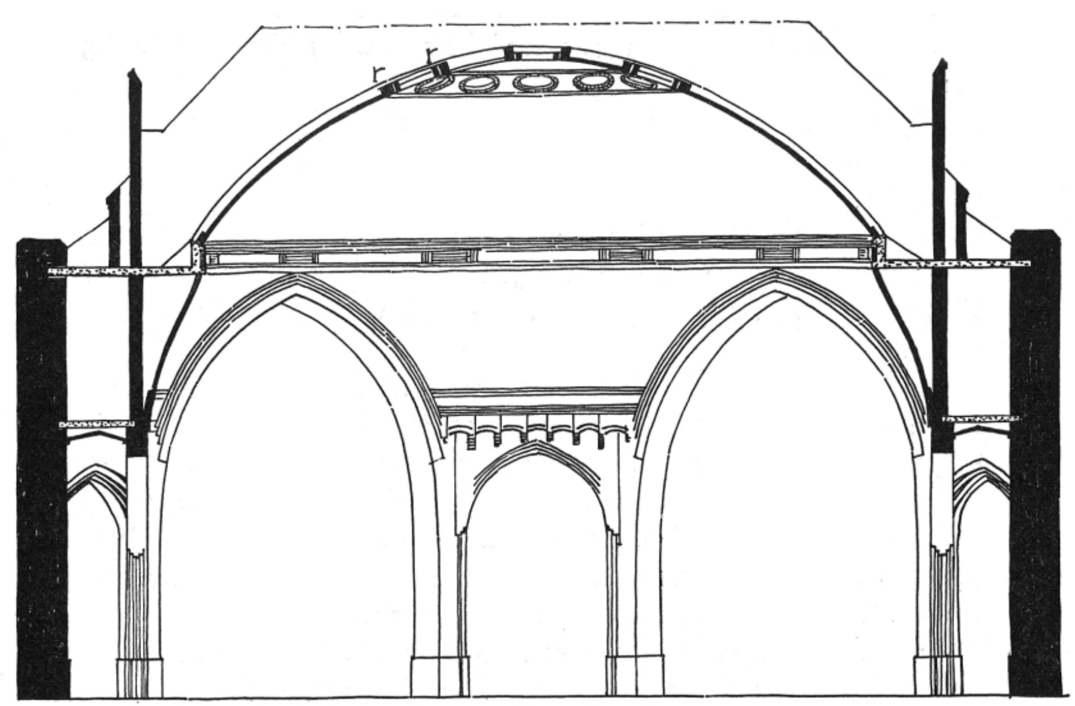
No hace falta decir, que ésta última forma de construir, la cúpula considerada como una estructura compuesta de arcos entre los que se tienden bóvedas, no es tan económica desde el punto de vista de la cantidad de material, como cuando se aprovechan todas las propiedades de la cúpula, esto es, cuando se asume que surgen tensiones radiales y pueden ser absorbidas.

Si las peligrosas tensiones anulares de tracción se pudieran eliminar o neutralizar, entonces se podrían construir cúpulas de cáscara de gran diámetro y suficiente resistencia con un mínimo de material.

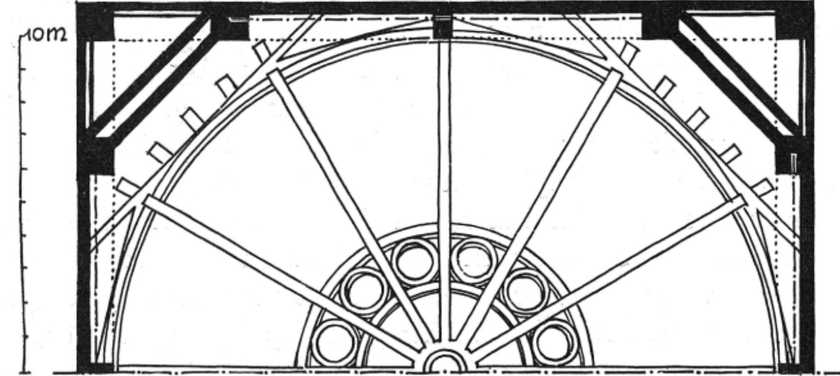
Para peso propio las tensiones de la cáscara no dependen del espesor y son muy bajas. Así, se podría dar el mismo grueso a una cáscara grande y a una pequeña. El límite de reducción del espesor depende del pandeo. Por este motivo se emplea una cierta cantidad de material en exceso, aunque los constructores de hormigón armado se aproximaron mucho al mínimo.

En las modernas cúpulas de fábrica vemos que, en la forma de construir, se ha producido un importante desarrollo explorándose todas sus posibilidades.

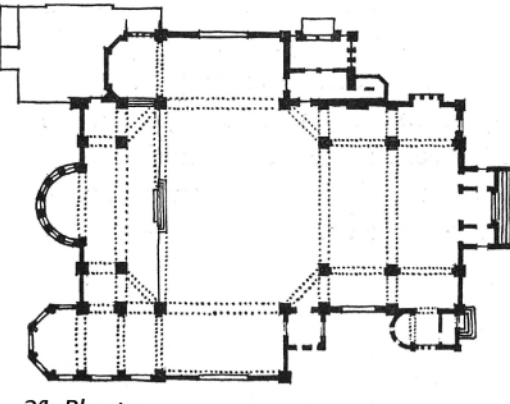
LÁMINA 129. CÚPULA DE CÁSCARA CON NERVIOS OCULTOS EN TILBURG. ARQ. J. v. d. VALK



1. Estructura de la cúpula de la iglesia católica de Tilburg. Proyecto, arq. Jan v. d. Valk.



2. Vista superior de la cúpula. Luz de la cúpula = 20m



2ª. Planta.

1. Sección por la diagonal del cuadrado grande de la planta. El empuje de la cúpula se absorbe por una viga anular de hormigón armado unida a lo muros perimetrales. Los nervios, situados sobre el trasdós de la cúpula, apoyan sobre esta viga y convergen en un óculo de fábrica. Están reforzados a partir de dos tercios de la altura de la cúpula por anillos r. La sección de la pechina es apuntada.

En Holanda, los arquitectos buscaron el camino con cierta vacilación. En la cúpula construida por el arquitecto Jan van der Valk para una iglesia en Tilburg vemos un intento de aprovechar las "propiedades de cáscara" de la cúpula (Láms. 129, 130).

Doce pilares forman la estructura portante. Sobre y entre los arcos que unen los pilares se formaron anchas pechinas sobre las que apoya la cúpula. Como constructor precavido, el arquitecto tomó diferentes medidas para estar seguro de que la cúpula sería firme y resistente. Las pechinas estaban estribadas por tabiques en su trasdós, que funcionaban de forma excelente como rellenos. Sobre estos tabiques colocó una losa de hormigón armado unida a un zuncho anular del mismo material, sobre el que apoyó la cúpula muy rebajada.

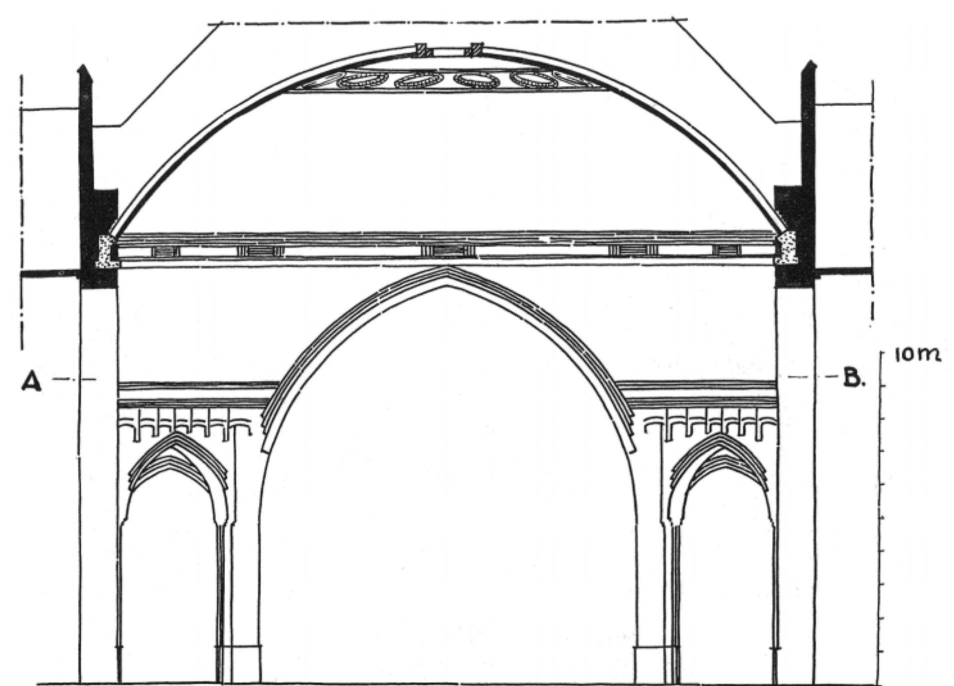
Esta cúpula, ejecutada con ladrillo ligero, está decorada en la parte superior con una corona de 12 aperturas redondas y un óculo central. Las molduras de todas estas aperturas se hicieron de ladrillo y se unieron mediante nervios circulares a un sistema de nervios resistentes de ladrillo dispuestos sobre el trasdós de la cúpula, que apoyaban en una base ensanchada sobre la placa de hormigón.

Es evidente que estos arcos sólo tienen utilidad para conducir el empuje en la dirección de los meridianos y solamente pueden reforzar la cúpula cuando están firmemente unidos a ella y son suficientemente fuertes como para absorber la carga, sin que surjan tensiones de tracción. La forma de estos nervios, aproximados a una línea catenaria, es por tanto muy apropiada. El empuje en la coronación será sin embargo bastante considerable con lo que el anillo superior se tiene que hacer muy resistente.

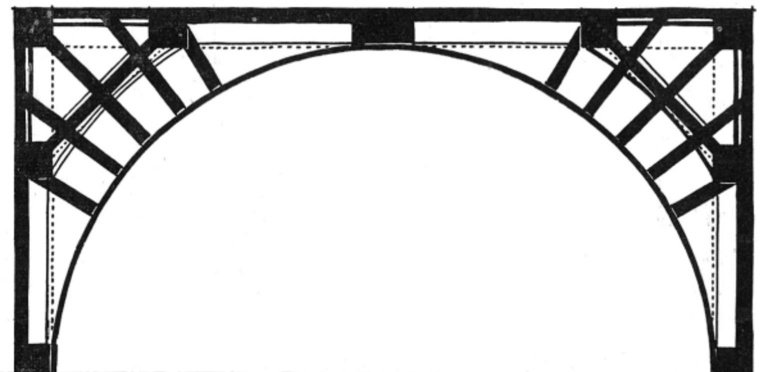
Las tensiones en los nervios serán mayores que en la cúpula (excepto en las partes que están inmediatamente próximas a los nervios), por lo que hay que ejecutarlos en un material más resistente.

CÚPULAS DE CÁSCARA: Como se ha dicho, los primeros constructores de cúpulas de hormigón armado aprovecharon de una manera más eficaz el funcionamiento de cáscara, al disponer de un material que podía resistir tanto tensiones de compresión como de tracción.

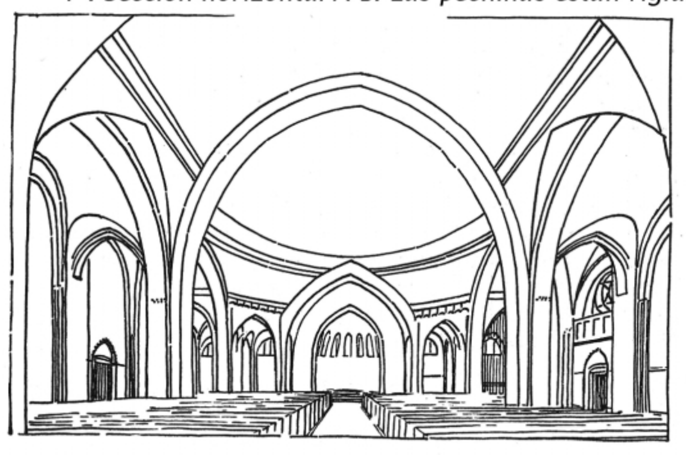
LÁMINA 130. CÚPULA DE CÁSCARA CON NERVIOS OCULTOS EN TILBURG.
ARQ. J. v. d. VALK



1. Estructura de la cúpula de la iglesia católica de Tilburg. Proyecto arq. Jan v. d. Valk.

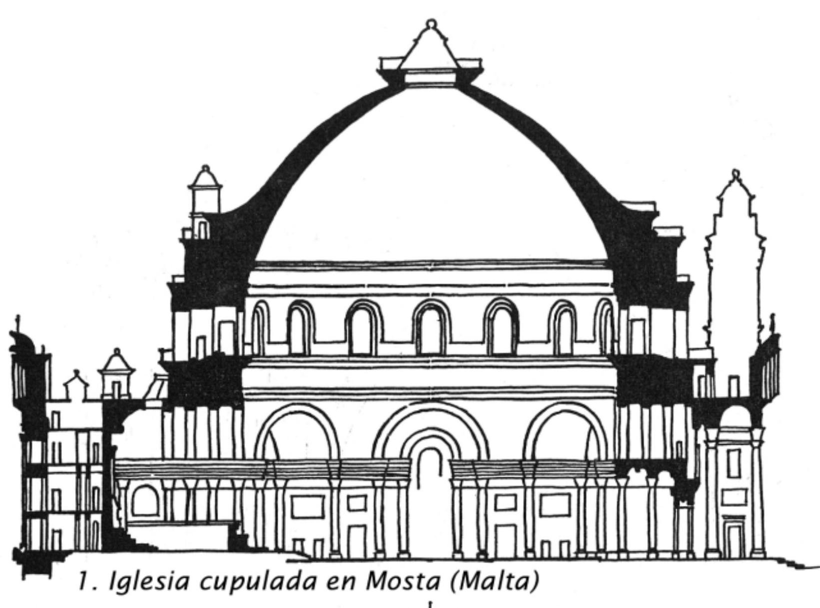


1ª. Sección horizontal A-B. Las pechinas están rigidizadas mediante tabiques.



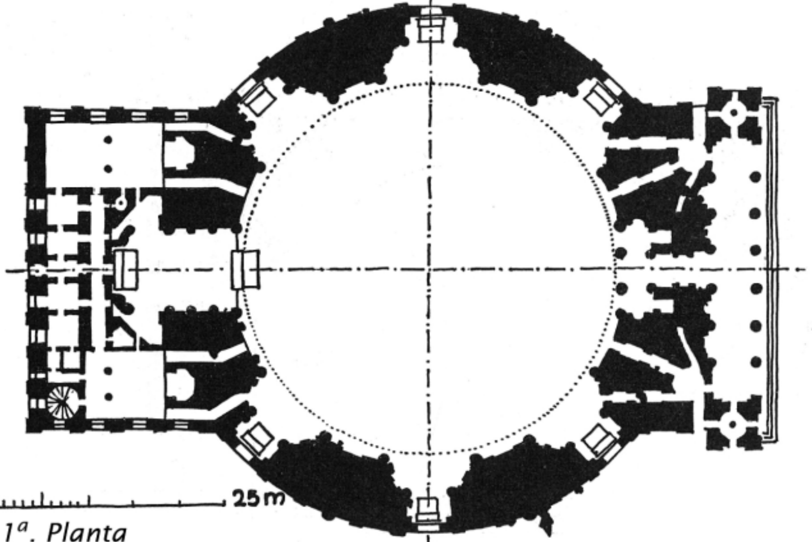
3. Vista interior de la cúpula. Entre los pilares próximos entre sí de los ángulos del cuadrado grande se han trazado arcos sobre los que apoyan las pechinas, lque además descansan sobre los arcos grandes.
La cúpula está construida con ladrillos ligeros y ha sido reforzada con arcos y nervios de ladrillo.
El conjunto está rigidizado por los elementos de hormigón armado.

LÁMINA 131. IGLESIA CON CÚPULA CENTRAL EN MOSTA (MALTA)



1. Iglesia cupulada en Mosta (Malta)

La construcción de está notable iglesia fue iniciada en 1840. El arquitecto local Groquet hizo el proyecto, con la intención de imitar el diseño del Panteón de Roma. El maestro constructor de su ejecución fue el albañil rural Angel Gatt, que no sabía leer ni escribir pero sí tenía un entendimiento muy adecuado, del cual se dejó guiar. La gran cúpula fue construida sin cimbra. Los lugareños trabajaron a la manera medieval bajo su dirección; él mismo se contentó con un exiguo sueldo semanal.



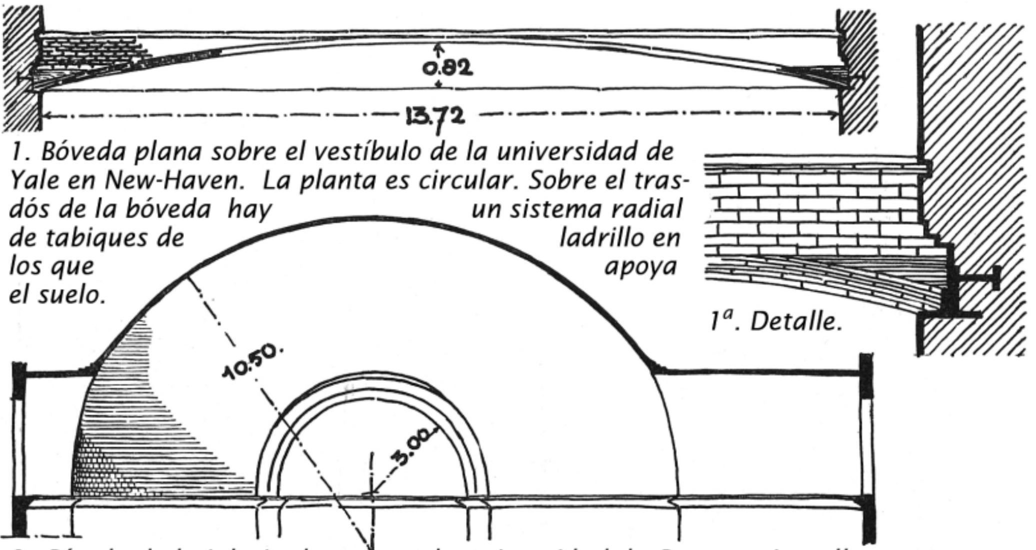
1ª. Planta

La enorme cúpula fue erigida entorno a la antigua iglesia; la construcción progresó tan rápidamente que en 1860 la antigua iglesia pudo ser demolida. Tanto la forma como el contrarresto de la cúpula son excelentes. Una gran masa de material asegura la estabilidad. El detalle de las molduras es desgraciadamente tosco e impersonal; fue tomado prestado de libros ilustrados de arquitectura.

2.

2. Vista exterior de la iglesia.
(1, 1ª y 2 según J.Fergusson)

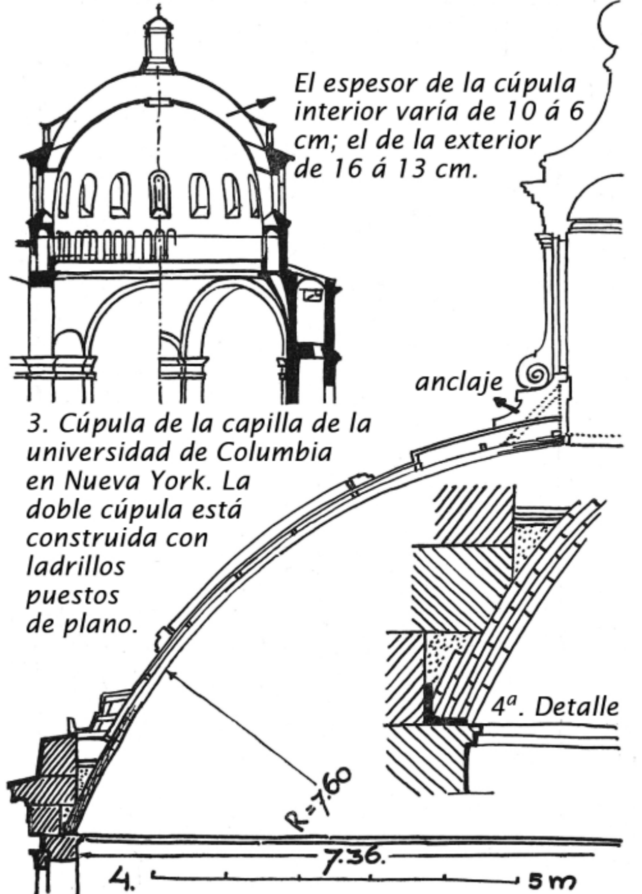
LÁMINA 132. CÚPULAS MODERNAS



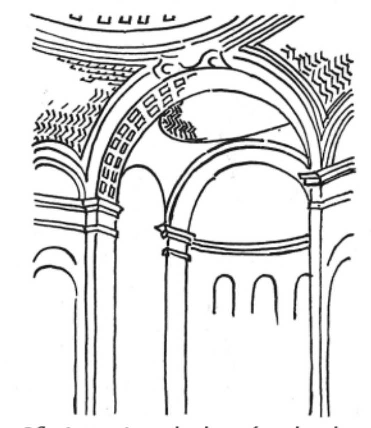
1. Bóveda plana sobre el vestíbulo de la universidad de Yale en New-Haven. La planta es circular. Sobre el trasdós de la bóveda hay un sistema radial de tabiques de ladrillo en los que apoya el suelo.

1ª. Detalle.

2. Cúpula de la iglesia de la universidad de Grace en Lowell. La cúpula tiene un espesor de sólo 10 cm en la clave. Las rasillas están colocadas con juntas alternadas.



3. Cúpula de la capilla de la universidad de Columbia en Nueva York. La doble cúpula está construida con ladrillos puestos de plano.



3ª. Interior de la cúpula de la universidad de Columbia. El aparejo de las bóvedas es de tipo espina de pez.

4. Cúpula sobre la gran sala de la universidad de Columbia. El espesor en la base tiene 18 cm; en la coronación 9 cm.

1-4 son bóvedas realizadas por la firma americana Guastavino con rasillas de aproximadamente 2,5 cm de espesor, según métodos originarios de España. Por este sistema se han realizado multitud de bóvedas (según Dunn).

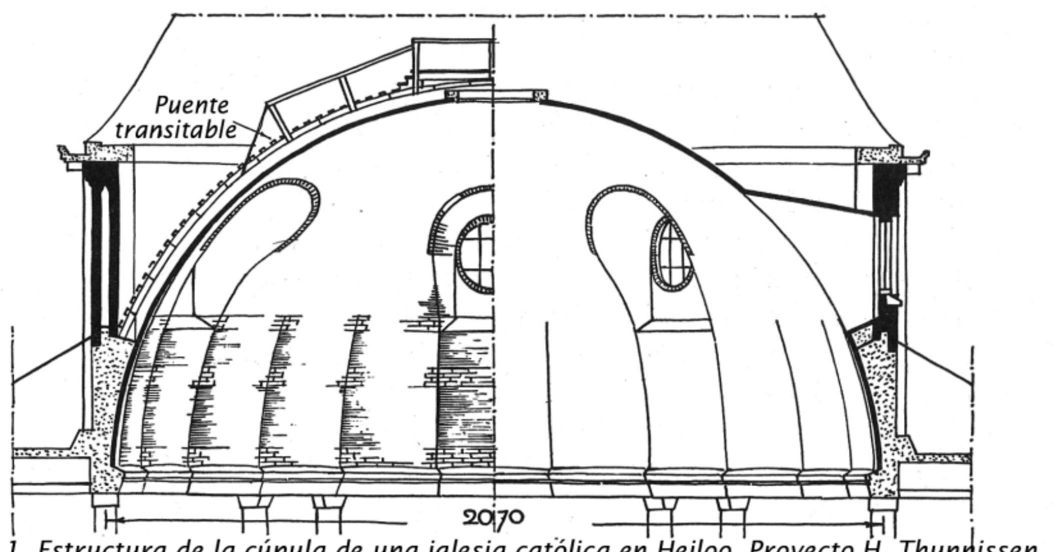
Después de que se hicieran las primeras bóvedas de cáscara en hormigón armado, pasaron diez años antes de que en América se acercaran también de forma consciente a la realización de cúpulas de fábrica de este tipo (Lám. 132).

La firma Guastavino cuyo fundador provenía de España ha realizado en América numerosas bóvedas según este moderno método. Para la cáscara se empleó el método usual en España e Italia desde hacía siglos de construirlas tabicadas, esto es, in situ con rasillas o ladrillos dispuestos de plano. Al principio, este método se usó sólo para la parte superior de la cúpula, es decir la zona en la que actúan las tensiones de compresión. El empuje lateral, que podía llegar a ser muy grande, fue neutralizado por la colocación de un zuncho de hierro al pie de la bóveda. Pero después de algunos experimentos se llegaron pronto a hacer también cúpulas de sección semicircular según este principio, en las que zunchos de hierro o de hormigón armado absorbían las tracciones. Un ejemplo de ello es la cúpula de la universidad de Columbia de Nueva York. Esta cúpula está cargada en la parte superior con una pesada linterna. Ésta influye de forma desfavorable en la situación de la zona en la que actúan tensiones de tracción, de forma que es obligado un zuncho rodeando la cúpula. El espesor de la cáscara de la cúpula no supera 18 cm, alcanzando una luz de aproximadamente 14,70 m (Lám. 132, fig. 3).

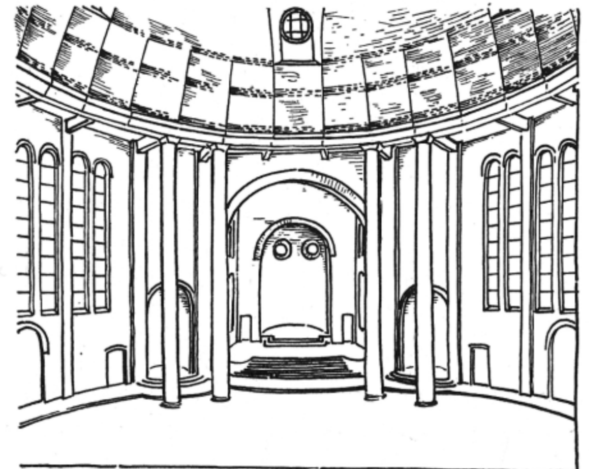
En nuestro país se realizó una cúpula de cáscara en la iglesia de planta central de Heiloo (Lám. 133). La cúpula, con una luz de 20 m, está soportada por doce columnas de hormigón armado unidas en la parte superior por una fuerte viga-zuncho inclinada de hormigón. Ésta tiene en la parte interior la misma forma que la bóveda, de manera que la cúpula de fábrica se apoya contra ella en la zona peligrosa en donde pueden aparecer las tensiones de tracción. En la parte baja de la cúpula se han hecho ligeros abombamientos agallonados que favorecen una buena ejecución sin cimbra, ya que solamente para las aristas se utilizaron ligeros arcos camones que sirvieron de guía a los albañiles.

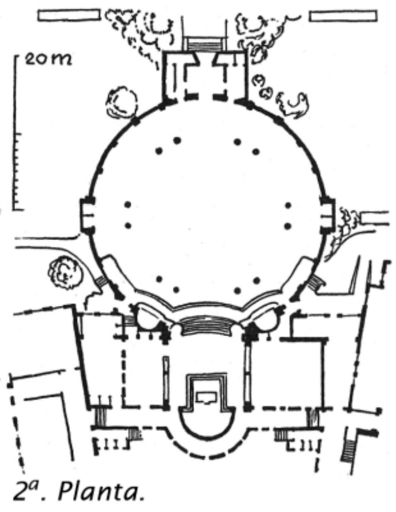
Para la ejecución de estos gallones se tiene que actuar con una supervisión adecuada, puesto que si se hacen demasiado profundos se pueden producir grandes tensiones. Durante su construcción, la cáscara de esta gran cúpula, a pesar de tener sólo 10 cm de espesor, resultó ser extraordinariamente sólida (Lám. 133, fig. 3).

LÁMINA 133. CÚPULA DE CÁSCARA EN HEILOO

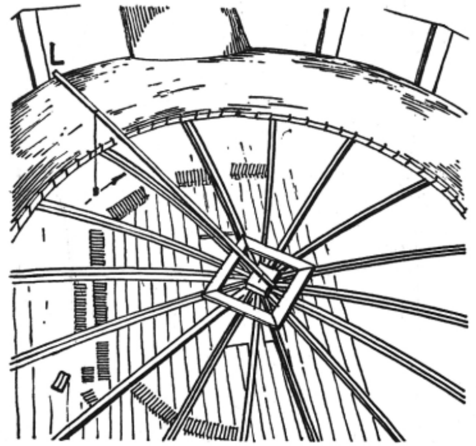


1. Estructura de la cúpula de una iglesia católica en Heiloo. Proyecto H. Thunnissen.


2. Vista interior de la cúpula.



2ª. Planta.


3. Vista superior de la cúpula.

1. Esta cúpula de cáscara, con un diámetro de 20 m y un espesor de 0,10 m, apoya contra una sólida viga de hormigón. Fue ejecutada al aire, con la guía de ligeros camones dispuestos en las aristas. El albañil obtenía la dirección correcta mediante un listón del que estaba colgado un plomo (fig.3). Los seis lunetos se apoyaron en cimbras especiales. Los paramentos de estos lunetos tienen 0,33 m hasta aproximadamente el punto medio de los arcos de las ventanas. Sobre la cúpula terminada se ha colocado un puente transitable. El material de la cúpula está formado por ladrillos hechos a mano de 5 x 10 x 20 cm y 10 x 10 x 30 cm.

Los albañiles anduvieron sin ningún miedo sobre el trasdós de la cúpula, que era suficientemente resistente como para soportar mucho más peso.

Para conseguir las mejores condiciones acústicas posibles la cúpula se realizó con capas alternas de ladrillos gruesos tradicionales holandeses (10 cm de espesor) y ladrillos conformados a mano de tipo Waal, cuyas juntas se hicieron rehundidas. Estas medidas resultaron eficaces ya que la acústica es excelente y no se produjeron ecos molestos.

Conviene señalar la necesidad de que en el proyecto se piense que las bóvedas deben ser practicables. En la construcción de Heiloo se colocó un puente sobre la cúpula para el cual se aprovecharon las cimbras empleadas en la ejecución de la albañilería.

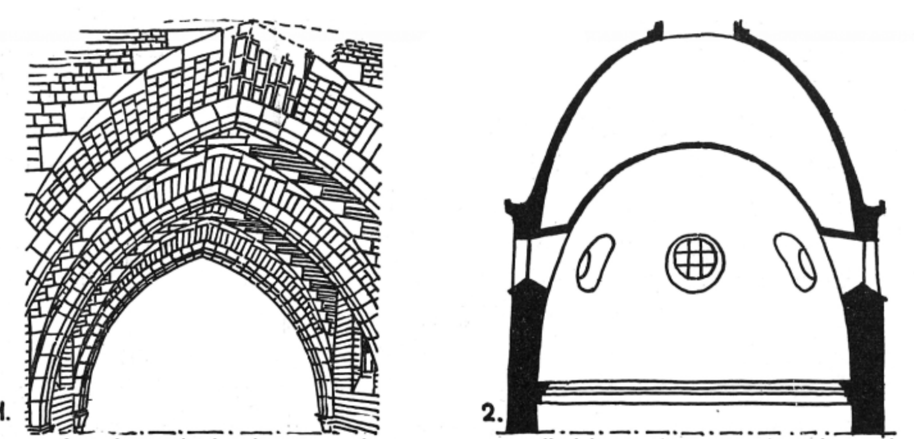
Cúpulas construidas con formas especiales de ladrillos y otras bóvedas: Dedicaremos aún algunas palabras a los intentos de los arquitectos para hacer bóvedas ligeras y resistentes con ladrillos de fabricación especial.

El sistema Fabre, que fue introducido alrededor de 1900 por este ingeniero francés, es un ejemplo de este método (Lám. 134, figs. 1, 2). Usó ladrillos huecos y delgados con un espesor de 4 cm de pared; en las bóvedas de crucería o de arista los nervios y aristas, esto es, los encuentros entre los paños se hicieron de ladrillos especiales. Bajo estos nervios o aristas se ponían las cimbras de madera de apoyo, tendiéndose después los paños al aire, sin cimbra. En 1900 cubrió por primera vez con bóvedas una iglesia en Signy-l'Abbaye en las Ardenas francesas con muy buen resultado (Lám. 134, fig. 1).

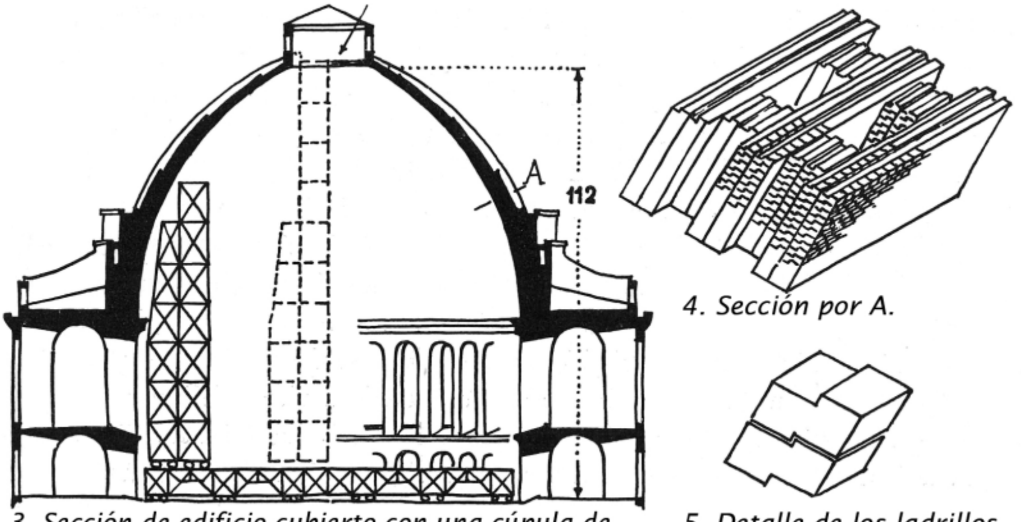
Después de una cierta experimentación con el sistema Fabre, Charles Girault, el arquitecto del Petit Palais de París, lo empleó para la construcción de sus cúpulas. La luz de la cúpula central es de unos 23 m, mientras que los pabellones de esquina, con una superficie en planta de 26×20 m^2, también se cubrieron con cúpulas de ladrillo. Estas grandes cúpulas tienen un espesor de 10 cm y presentan una considerable rigidez (Lám. 134, fig. 2).

En 1942 el profesor Mäkelt publicó el proyecto de una cúpula con una luz de 100 m. Planteó la ejecución según el sistema de celdas, tal como Brunelleschi había hecho siglos antes en la cúpula de Florencia, si bien aumentó el número de capas y de anillos. La mayor parte de la bóveda se podría hacer de ladrillos ligeros

LÁMINA 134. BÓVEDAS MODERNAS REALIZADAS CON LADRILLOS ESPECIALES



1. Construcción abovedada de una iglesia en Signy l'Abbaye (Francia) utilizando ladrillos cocidos de formas especiales. 2. Cúpula del Petit Palais de París empleando ladrillos huecos (1 y 2 según el sistema Fabre).



3. Sección de edificio cubierto con una cúpula de 100 m de luz, con los andamios dibujados.

4. Sección por A.

5. Detalle de los ladrillos.

100 m

El profesor Mäkelt ha publicado el proyecto de una cúpula de 100 m de luz. Diseñó la cúpula con ladrillos ligeros de hormigón (hormigón de escorias), que debían unirse entre sí mediante cajeados; además pensó un ingenioso andamiaje móvil para facilitar la ejecución. La técnica moderna nos permite alcanzar grandes luces. (3-5 según Mäkelt)

3ª. Planta del edificio. Se han colocado galerías alrededor para el contrarresto de la cúpula.

aplantillados especiales, de piedra pómez, hormigón de escoria o ladrillos porosos; solamente para las partes en las que actuara una gran tensión propuso emplear otros ladrillos más duros.

Con el tamaño crece el coste de las cimbras, que deben construirse con el menor gasto posible. En su propuesta indica cómo se puede construir la parte superior empleando andamios de acero y cimbras móviles (Lám. 134, fig.3-5).

Durante los años de la guerra, en Alemania se prestó atención a las bóvedas tabicadas ligeras originarias de España e Italia, que pueden tener aplicación también en bóvedas modernas (Lám. 86).

Un empleo renovador de un antiguo método lo proporciona el «fusée céramique», el tubo cerámico hueco. Los antiguos bizantinos ya hicieron varias cúpulas con una especie de tubos de drenaje que se embutían unos dentro de otros y se rodeaban de mortero. Durante la guerra este procedimiento fue usado a gran escala por los franceses en el norte de África; construyeron numerosos cobertizos y viviendas para fines militares cubiertas con este tipo de bóvedas, que satisfacen altas exigencias en relación al aislamiento. Los buenos resultados obtenidos, dieron motivo a la fundación de una sociedad que también tiene un departamento en los Países Bajos y que emplea este método para todo tipo de finalidades, dado que sin grandes inconvenientes se pueden cubrir grandes espacios, hacer puentes, etc.

Los tubos tienen una longitud de 35 cm, un diámetro exterior de 8 cm y un grosor de pared de 10 mm. La parte inferior tiene forma de embudo estando las paredes exteriores provistas de estrías. Para el cierre de las bóvedas en la coronación existen pequeños tubos sin extremos en forma de embudo. Se colocan unos dentro de otros a lo largo del ancho del espacio a cubrir en una, dos o más capas superpuestas; si es preciso, se pueden colocar también armaduras de hierro.

5
Estabilidad de las bóvedas

Los métodos usuales de hoy en día para el análisis de la estabilidad de las bóvedas son todavía recientes. En 1729 Couplet publicó un estudio sobre el empuje de las bóvedas y tres años más tarde fue continuado con experimentos por Danyzy con lo que estableció reglas para la determinación de las dimensiones de los muros soportes de las bóvedas. Otros autores diferentes le siguieron después, entre los que sobre todos debe citarse al eficiente constructor Rondelet. Éste hizo numerosos ensayos sobre la formación de grietas en las bóvedas fuertemente cargadas y sobre el deslizamiento de las piedras.

La teoría y el análisis estático obtuvo al comienzo del siglo XIX sus fundamentos básicos gracias a las citadas investigaciones y a las de ingenieros ingleses, alemanes, franceses e italianos, entre los que debe citarse principalmente a Durand-Claye, Barlow, Eddy, Moseley, Navier, Poncelet, Persy, Rankine, Scheffler, Schwedler, Tarn y Winkler. El primero de ellos llegó a una teoría en relación al análisis de arcos y bóvedas de cañón y después a un método práctico útil para las cúpulas. El desarrollo de los entramados metálicos tuvo entonces muchas contribuciones.

Para las siguientes consideraciones supondremos en el lector un conocimiento elemental de la estática y la resistencia de materiales.

Arcos y bóvedas son construcciones hiperestáticas, de forma que los esfuerzos internos, fuerzas y momentos, no se pueden determinar exclusivamen-

te con ayuda del conocimiento del equilibrio. Para su análisis se parte del supuesto de que si en una bóveda es posible un estado de equilibrio, éste ocurrirá realmente.

El equilibrio de una bóveda se estudia buscando una línea de empujes, con ayuda de un polígono de fuerzas, que discurra por la bóveda de forma satisfactoria. (Una línea de empuje es una línea curva que representa la trayectoria de los empujes cuya dirección es, aproximadamente, tangente a la línea, Lám.135.) Si esto no se consigue se tendrá que, bien cambiar la forma de la bóveda, o bien cargar la bóveda de otra manera diferente. Si se consigue encontrar dentro de ella una línea de empujes satisfactoria, por ejemplo una línea de empujes que vaya por el núcleo central de la bóveda, esto es, que discurra por dentro del tercio central de su espesor, entonces se considera la bóveda como una construcción estáticamente satisfactoria.

Otro método diferente y aún más reciente de análisis de la estabilidad de la bóveda se basa la teoría de la elasticidad. Se considera la bóveda como un sólido elástico empotrado en los arranques. En sus diferentes secciones se calculan momentos en el núcleo para diferentes casos de carga actuante a partir de los cuales se deducen las tensiones en los puntos extremos de las secciones.

Tanto este método como el de la comprobación del discurrir de las líneas de empujes, conducen a resultados satisfactorios si se usan los cálculos como base para determinar los pesos de las bóvedas y si, en su realización, se procede con un buen entendimiento constructivo.

No obstante, ambos métodos se apoyan en hipótesis que en realidad no son completamente exactas. En el primero, por la suposición de que no ocurrirá ningún cambio de forma, esto es, se considera que, después de la acción de las fuerzas, las diferentes partes estarán todavía en la misma posición, unas sobre otras. Puesto que esta suposición no es completamente conforme con la realidad, no hay que contentarse con una única línea de empujes que permanezca dentro del núcleo central, sino que, como mínimo, esto debe ser posible para un pequeño grupo de líneas. En el segundo, el método elástico, se supone que los materiales siguen la ley de Navier-Hooke en relación a las deformaciones. Pero el módulo de elasticidad no es constante para el material de la bóveda, ya que el del mortero en las juntas es diferente del de los ladrillos o la piedra (la bóveda es una

construcción compuesta); es también diferente a compresión y a tracción; finalmente, cambia con la magnitud de las fuerzas. Sin embargo, y a pesar de estos defectos, ambos métodos nos dan una comprensión suficiente de la estabilidad de las estructuras.

Las construcciones abovedadas pueden también analizarse por medios experimentales. Estos análisis tienen lugar en laboratorios. En el extranjero se han hecho ya pruebas sobre estructuras estáticamente indeterminadas (Prof. Beggs, Princeton University, EE.UU.) que pueden ser de aplicación también a las bóvedas.

El método elástico, que se usa habitualmente sólo para estructuras de dos dimensiones, ha sido en nuestro país ampliado a estructuras tridimensionales (Laboratorio de Estática de la Construcción de La Haya; fundado en 1949). Con este método se pueden determinar, entre otras cosas, los empujes en el arranque y los momentos de empotramiento. Las cúpulas pueden analizarse considerando sus deformaciones elásticas, de modo que se puede determinar la curva de momentos actuante en direcciones fijadas de antemano mediante la medida de la distorsión de los ángulos. Los métodos elásticos han encontrado todavía poca aplicación, pero para el futuro de la construcción abovedada abren importantes perspectivas.

En nuestras consideraciones haremos uso exclusivamente del primer método, mediante el cual analizaremos: 1) arcos y bóvedas de cañón; 2) bóvedas compuestas, como bóvedas de arista, estrelladas y reticulares; y 3) cúpulas.

5.1 Análisis de arcos y bóvedas de cañón

El deslizamiento de las piezas

En los ensayos que hizo Rondelet para analizar la estabilidad de los arcos llegó a la conclusión de que dos piedras superpuestas según una dirección inclinada se mantendrían fijas bajo ángulos de rozamiento entre 28º y 36°. Si el ángulo de inclinación se hace más grande, entonces deslizan y las pequeñas imperfecciones de las superficies de contacto se alisan; el polvo que se forma fomenta el deslizamiento tras lo cual sucede el colapso.

Normalmente, se supone que el ángulo de rozamiento, empleando un buen mortero, es de aproximadamente 30° (Lám. 135, fig.1). Si este ángulo se sobrepasa entonces las piedras deben soportarse de alguna forma hasta que el mortero esté suficientemente endurecido. Esto se tiene que tener en cuenta debidamente sobre todo en la ejecución al aire de bóvedas sin cimbra.

En los morteros usuales de endurecimiento rápido el peligro de deslizamiento es también pequeño poco después de la ejecución, incluso si la línea de empujes forma un ángulo mayor de 30° con la dirección de las juntas. Esto se debe a que la adhesión del mortero a las piedras es muy fuerte y las juntas son quizás incluso más fuertes que las mismas piedras.

Influencia de la excentricidad de los empujes

Por lo general la sección de un arco tomada perpendicular a la línea directriz será rectangular. Podemos considerar una bóveda de cañón como una serie de arcos consecutivos y, por tanto, su sección también será un rectángulo.

Por resistencia de materiales sabemos que en una sección no surgirán tensiones de tracción si la fuerza de compresión actuante, dirigida perpendicular a la sección, permanece dentro de su núcleo central de inercia (Lám.135, figs. 2–4).

Este núcleo es, en una sección rectangular, un rombo en el que las diagonales son respectivamente iguales a un tercio de la longitud y un tercio de la anchura de la sección. En una sección en T, la forma del núcleo central adopta una forma diferente. Se acepta que en un arco que sea suficientemente ancho, el núcleo caerá en una banda que se encuentra en su tercio medio (Lám. 138, figs. 5–6).

Incluso en arcos que son estrechos y en los que se sabe con seguridad que actúa un empuje central, tales como por ejemplo en los arcos de hormigón armado, se acepta que el núcleo tiene una sección romboidal. Si la fuerza incide en el centro de gravedad del núcleo, la tensión es uniforme en toda la sección; si cae justo en el límite del núcleo, entonces la tensión es nula en un extremo de la sección y, al otro lado, doble de la tensión media, correspondiente al empuje en el centro.

Si la fuerza cae fuera del núcleo, la tensión de compresión crece en un lado de la sección, mientras que en el otro lado, las tensiones serán de tracción. Estas tensiones de tracción se deben evitar en las construcciones de fábrica pues causan pequeñas grietas, que posteriormente aumentan, y pueden dar lugar a la rotura. Se debe, por consiguiente, considerar esta regla: una línea de empujes satisfactoria en un arco debe estar contenida siempre dentro del núcleo central de inercia.

Si sobre un arco actúa una fuerza en dirección oblicua, que da una componente perpendicular al plano del arco, entonces se produce una torsión y, en consecuencia, se originan tensiones de tracción. A los arcos se les debe dar suficiente ancho para impedir que puedan fracturarse lateralmente, sobre todo si no están apoyados por paños contiguos.

En lo que a la longitud de pandeo se refiere, se pueden seguir las indicaciones de la Comisión de Normalización concernientes a pilares y columnas de fábrica, tomando como longitud de pandeo la mitad de la longitud del arco y como fuerza normal la componente horizontal del empuje (Láms. 135–136).

El dibujo de líneas de empujes en un arco

Se dibuja primero la sesión del arco y se divide en un número de partes aproximadamente iguales. Estas se pueden tomar, bien según la dirección de las juntas, o bien en dirección vertical.

Se calculan a continuación los pesos de estas partes, se define una cierta escala de fuerzas (por ejemplo, 1 kN = 1 cm), y se colocan estos pesos (fuerzas) como vectores unos a continuación los otros.

Después se trata de equilibrar estos pesos con un sistema de fuerzas internas dentro del núcleo del arco. Esto se hace de la manera usual, con ayuda del polígono de fuerzas. Si se consigue dibujar una buena línea de empujes dentro del arco, entonces se puede asumir que el arco es estable a menos que sufra deformaciones apreciables.

Es evidente que se puede construir un número muy grande de líneas de empujes. Se necesita alguna práctica y experiencia para hallar rápidamente la adecuada, o llegar a la conclusión de que encontrar una línea de empujes adecuada es imposible.

En el último caso se ha de elegir entre las siguientes opciones:

— Hacer el arco más grueso, sea en toda su longitud o localmente, por ejemplo, cerca de los arranques. El núcleo se ensancha y aumenta la posibilidad de que la línea de empujes permanezca en su interior.
— Cambiar las cargas. En un arco apuntado puede ser favorable hacer más pesada la clave para conseguir que sea posible una buena línea de empujes.
— Cambiar la forma del arco. A veces se toma como forma del arco, la del antifunicular de las cargas permanentes (por ejemplo una parábola o catenaria); naturalmente, estos arcos son muy estables.

En general se comprobará si se puede trazar un grupo de varias líneas de empuje que pasen por el núcleo, ya que por asientos o por cargas móviles, etc., la línea de empujes puede cambiar de posición dentro del arco.

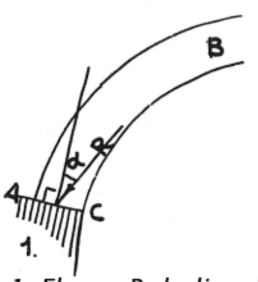
En un arco o bóveda de cañón se pueden dar los siguientes casos.

– El arco es simétrico y soporta:
  solamente su propio peso
  una carga simétricamente repartida
– El arco es simétrico y soporta una carga asimétrica, o es un arco asimétrico.
– Arcos que soportan la acción del viento.

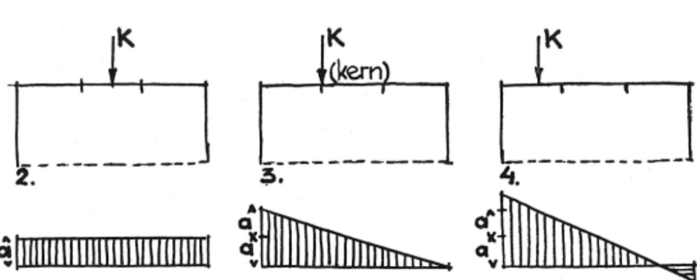
ARCO SIMÉTRICO: Consideremos el primer caso, que es el más sencillo (Lám. 135, fig. 7). Puesto que ambas mitades son idénticas, bastará con el análisis de una mitad del arco, esto es, basta dibujar el polígono funicular o línea de empujes para medio arco. Como ambas mitades se mantienen en equilibrio entre sí, el empuje en la clave ejercido por una parte sobre la otra debe ser horizontal.

El peso de la mitad del arco es conocido y debe estar en equilibrio con la reacción en el arranque y con el empuje horizontal en la clave. (Con ayuda un polígono de fuerzas y un polígono funicular se puede determinar de forma sencilla la posición de la fuerza *G* resultante del peso del arco.). Estas tres fuerzas se tienen que cortar en un punto, es decir, el peso *G,* el empuje *H* y la reacción *R* en el arranque deben pasar por un punto.

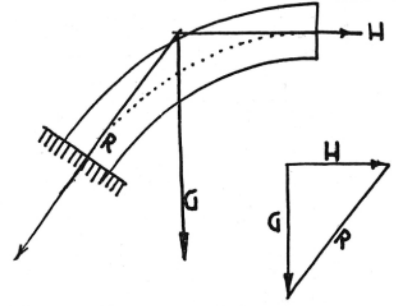
LÁMINA 135. LA TRAYECTORIA DE LAS LÍNEAS DE EMPUJES EN ARCOS



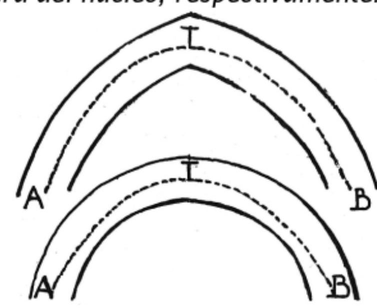
1. El arco B *deslizará sobre el plano* AC *cuando la resultante* R *tenga una dirección demasiado oblicua. El ángulo* α *debe ser ≤ 30º.*



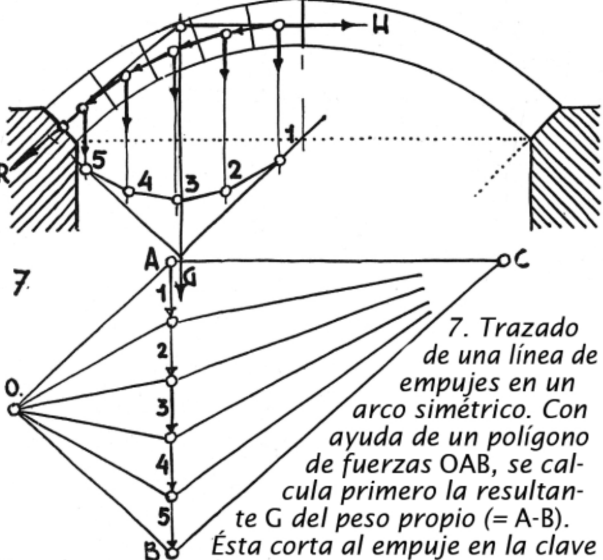
2, 3, 4 representan una sección sobre la que actúa una fuerza K*. En 2,* K *se aplica en el centro de gravedad. En la sección aparece un reparto uniforme de tensiones* a*. Figs. 3 y 4 son los diagramas de tensiones correspondientes a un fuerza* K *sobre un punto en el límite del núcleo central de inercia y fuera del núcleo, respectivamente.*



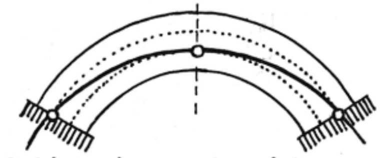
5. El peso G *de una bóveda se puede descomponer, por medio de un triángulo de fuerzas, en una reacción* R *pasando por la mitad del arranque y en un empuje en la clave* H *pasando por su punto medio.*



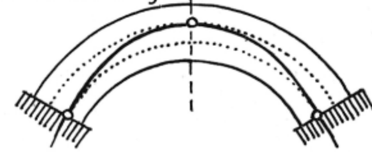
6. ATB *representa la línea de empujes en un arco. Se han dibujado diferentes formas de arcos para establecer comparaciones.*



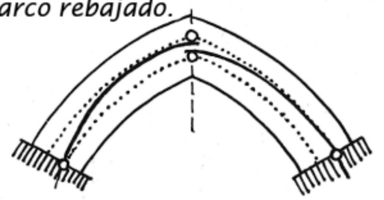
7. Trazado de una línea de empujes en un arco simétrico. Con ayuda de un polígono de fuerzas OAB*, se calcula primero la resultante* G *del peso propio (=* A-B*). Ésta corta al empuje en la clave* H *y al empuje en el arranque* R *en un punto.* H *y* R *pasan por la mitad de la clave y del arranque. Después y con ayuda del polígono de fuerzas* ABC *se dibuja la línea de empujes del arco.*



8. Línea de empuje máximo en un arco rebajado.



9. Línea de empuje mínimo en un arco rebajado.



10. Líneas de empuje máximo, a la derecha, y mínimo, a la izquierda, de un arco apuntado.

Los datos de que ahora disponemos permiten un gran número de soluciones, pues son desconocidos el punto de aplicación de *H* y la dirección de *R*, que determinan las magnitudes de *H* y *R.* Si se considera que una pareja de estas incógnitas es conocida, se pueden encontrar fácilmente las otras incógnitas por el dibujo de un triángulo de fuerzas para *H, R* y *G.*

Si se hace pasar, por ejemplo, *H* por la mitad de la sección de la bóveda en la clave, y *R* por el medio del arranque del arco, el problema está completamente determinado, ya que *R* debe pasar por el punto de corte de *H* y *G,* y puesto que la magnitud de *G* (el peso del arco) es conocida, lo son también las magnitudes de *R* y *H* (Lám. 135, fig. 5).

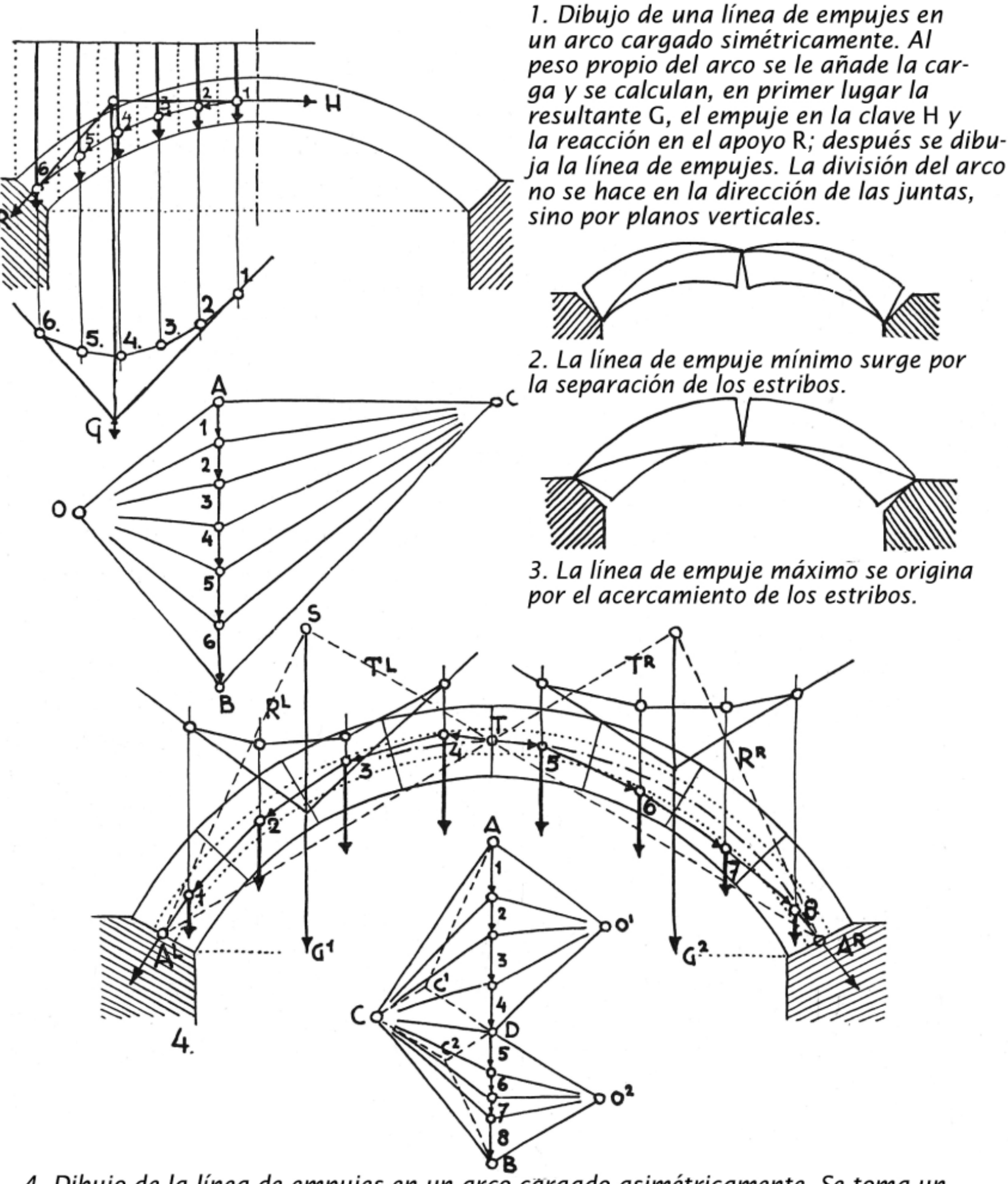
Es evidente que también se puede tomar primero el punto de aplicación de *H* y decidir uno u otro valor para su magnitud, después de lo cual, y de la misma forma que antes, se puede encontrar sin dificultad la magnitud y dirección de *R* por medio del triángulo de fuerzas. Esto se puede aplicar también en el análisis de la estabilidad de bóvedas de crucería.

En el análisis de un arco o de una bóveda se puede obtener una impresión provisional del discurrir de la línea de empujes mediante alguna de las formas aquí indicadas, ya que *H* y *R* son partes de la línea de empujes o polígono antifunicular; *H* es el primer tramo y *R* el último. Con dicho objetivo, el punto de aplicación de *H* se coloca, en bóvedas y arcos rebajados, primero en la parte de arriba del núcleo y después en su extremo inferior, haciéndose pasar después también la reacción *R,* en la medida de lo posible, por la parte exterior del núcleo (Lám. 135, figs. 8 y 9).

En el primer caso se obtiene el menor empuje posible en dirección horizontal (asumiendo que la línea de empuje debe permanecer en el núcleo). Se habla entonces de la línea de empuje mínimo. En el segundo caso se tiene el máximo empuje horizontal; se habla entonces de la línea de empuje máximo.

En arcos apuntados la línea de empujes discurrirá muy probablemente en algunos puntos fuera del núcleo, si se hace pasar por los extremos de la clave y el arranque. En estos casos, la línea de empujes se hace pasar solamente en el arranque por ambos extremos del núcleo y se intenta que se aproxime el máximo posible a los puntos extremos de la línea del núcleo. La línea de empujes que

LÁMINA 136. DETERMINACIÓN DE LAS LÍNEAS DE EMPUJES EN ARCOS



1. Dibujo de una línea de empujes en un arco cargado simétricamente. Al peso propio del arco se le añade la carga y se calculan, en primer lugar la resultante G, *el empuje en la clave* H *y la reacción en el apoyo* R*; después se dibuja la línea de empujes. La división del arco no se hace en la dirección de las juntas, sino por planos verticales.*

2. La línea de empuje mínimo surge por la separación de los estribos.

3. La línea de empuje máximo se origina por el acercamiento de los estribos.

4. Dibujo de la línea de empujes en un arco cargado asimétricamente. Se toma un punto de la línea de empujes en el punto medio de la sección de la clave, se añade la carga al peso propio del arco y se determinan, con ayuda de los polígonos de fuerzas AO^1D *y* DO^2B, *para la mitad izquierda la resultante* G^1, *y para la mitad derecha la resultante* G^2, *de los pesos de cada parte. Después se descompone* G^1 *en una reacción en el arranque* R^L *y en un empuje en la coronación* T^L, *con ayuda del triángulo de fuerzas* AC^1D *(ver polígono de fuerzas);* R^L *pasa por el punto medio del arranque,* T^L *por la mitad de la coronación y del arranque. Se hace lo mismo con* G^2. *Se busca un polo* C *tomando* CC^1 *paralelo a* C^2D *y* CC^2 *paralelo a* C^1D. *Se dibuja la línea de empujes* 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 *con el polígono de fuerzas* CAB. *Esta línea de empujes queda fuera del núcleo central de inercia en el lado derecho; hay que comprobar si con un pequeño desplazamiento del polo C puede permanecer en el núcleo.*

vaya más cerca de la parte inferior del núcleo es entonces la línea de empuje máximo y la otra, la línea de empuje mínimo (Lám. 135, fig. 10).

Cuanto más grande sea la diferencia entre ambas líneas de empujes, más amplio podrá ser el conjunto de líneas de empujes que discurra por el núcleo y, por tanto, más estable será el arco.

El arranque no tiene que estar necesariamente en la parte más baja del arco; en un arco semicircular que esté trasdosado con un relleno horizontal se calcula que éste está en un plano que pasa por el centro y forma un ángulo de 30° con la horizontal. Por lo general el trasdós de una bóveda se rellena como mínimo hasta esta altura.

A veces no es posible construir una línea de empujes que pase en el arranque por el lado extremo del núcleo, pero sí una en la que en la coronación y en el arranque permanezca dentro del núcleo pero que en algunos otros puntos sea tangente a los extremos del núcleo. Con algunos tanteos se pueden encontrar tales líneas de empuje; se puede confiar en ellas si se está seguro de que el arco o la bóveda no sufrirá cambios de forma ni será expuesto a cargas imprevistas. Pero como de ello raras veces se está seguro, se aconseja al constructor ser en extremo precavido.

Ya dijimos que la línea de empujes no se aparta por igual de la línea media del núcleo en todas partes. Donde la línea de empujes más se aproxima a la parte exterior del arco, es decir, donde la excentricidad es mayor, la tensión en el borde de la sección se hace también máxima, de forma que en ese punto se producirá la primera rotura. Estos puntos se llaman juntas de rotura.

La magnitud de las tensiones en una sección se puede determinar fácilmente, ya que el valor del empuje se obtiene directamente del polígono de fuerzas, y su posición se conoce por la línea de empujes. En general, el punto de aplicación no coincide con el centro de la sección, y esto conduce a distribuciones de tensiones no uniformes.

La forma más favorable de línea de empujes para arcos de diferentes perfiles es casi siempre la misma: se aproxima a la parábola tanto para la forma semicircular como para el arco apuntado. De ello se deduce que es fácil dibujar en un arco una línea de empujes que tenga aproximadamente la forma parabólica, tal como por ejemplo un arco escarzano o un arco oval peraltado, y difícil

en un arco que se desvíe considerablemente de ellos, como por ejemplo, un arco de medio punto o uno muy apuntado. La línea de empujes en estos arcos no tocará en los mismos puntos a la superficie del núcleo central, de forma que las juntas de rotura se situarán en distintos puntos dependiendo de la forma del arco.

Es evidente que debe cumplirse la condición de que la tensión en todas las secciones del arco tiene que ser menor que la tensión admisible del material.

Puede ocurrir que un arco simétrico soporte una carga simétrica, además de su propio peso. Este puede ser el caso de arcos que están trasdosados horizontalmente, hasta la altura de la clave, por ejemplo, los arcos de los puentes. Para la determinación de la línea de empujes se añade la carga del arco al peso propio. Se divide el arco nuevamente en partes pero, por comodidad, no se toman según la dirección de las juntas, sino en dirección vertical.

ARCO SIMÉTRICO CON CARGA ASIMÉTRICA. ARCOS ASIMÉTRICOS. INFLUENCIA DEL VIENTO: La línea de empujes será, en todos estos casos, también asimétrica. Su trazado se determina de forma análoga a los casos anteriores. Por ejemplo, podemos suponer que pasa por la mitad de la clave y por las mitades de los arranques. Si buscamos las líneas de empujes máximo y mínimo, dibujaremos la línea (en la medida de lo posible) por los puntos extremos del núcleo en la clave y los arranques. La construcción de una línea antifunicular que, para un sistema de fuerzas dado, pase por tres puntos, se repite frecuentemente en mecánica aplicada, de manera que para dicha construcción se puede acudir a la Lám. 136, fig. 4, o a los manuales de estática gráfica.

En estos casos, la dirección de la línea de empujes en la clave no será en general horizontal, pero la mayoría de las veces no hay una gran diferencia entre esta línea de empujes y la de una bóveda simétrica.

Los arcos y bóvedas asimétricos se emplean en arquitectura en diferentes casos, por ejemplo, en las escaleras de fábrica o en los arbotantes de las iglesias góticas.

El viento produce con frecuencia cargas diferentes sobre las dos mitades de una bóveda. Por consiguiente haremos aquí una corta digresión sobre la influen-

cia del viento y de las cargas asimétricas en las construcciones abovedadas. Muchas veces las vigas de la techumbre de una iglesia descansan sobre arcos perpiaños, anchos y pesados, que salvan nave. En este caso, las vigas transmiten el viento a los arcos. Este tipo de construcción se puede emplear a menudo con buenas resultados. Otras veces, se usan construcciones arqueadas para objetivos para los que no son adecuadas. Por ejemplo, para el apoyo de un pie derecho de la armadura de la cubierta; este apoyo crea una gran carga concentrada sobre el arco, que produce una perturbación en el discurrir continuo de las líneas de empuje. También los golpes y las sacudidas pueden ejercer una funesta influencia sobre la solidez y firmeza de los arcos. En el caso antes citado de las vigas descansando sobre arcos anchos y pesados, la carga ejercida por el viento se tiene, además, que combinar también con el peso propio.

La Comisión de Normalización ha fijado las directrices para los valores que pueden alcanzar las fuerzas del viento en diferentes partes de nuestro país y cómo estas fuerzas inciden sobre los muros verticales (ya estén situados frente al viento, o a sotavento, sufriendo fuerzas de succión), y en los faldones de la cubierta; para su cálculo se ha de atender a las prescripciones de esta norma.

En la Lám. 138, fig. 1 se muestran las líneas de empujes dibujadas por Ungewitter en la sección de una iglesia gótica. Hay que señalar que la incidencia de las fuerzas del viento es diferente a la que se indica en las prescripciones de la norma.

ARCOS CONTRA EL VIENTO: En las iglesias góticas se ven frecuentemente arbotantes que, dispuestos lateralmente contra la nave principal, dan apoyo a la iglesia (Lám. 138). Por lo general tienen una doble función: en primer lugar estriban la bóveda tendida sobre el vano principal ejerciendo un contrarresto; en segundo lugar dan rigidez al cuerpo de la iglesia y ofrecen resistencia contra la presión ejercida por el viento.

En cuanto a la primera función citada, proporcionar el contra-empuje, obliga a que los arcos se hagan pesados y a que su forma se elija de tal manera que se obtenga un empuje permanente contrapuesto al que ejercen las bóvedas.

Para la segunda función, la rigidización del cuerpo de la iglesia, el peso propio del arco no tiene que ser demasiado grande; por el contrario, en circunstancias normales es deseable que el arco ejerza el menor empuje lateral posible; pero debe

de estar en condiciones de ofrecer un gran contrarresto en caso de viento fuerte. El arco debe ser, por tanto, indeformable y rígido para que pueda trasladar fácilmente el empuje del viento hacia los estribos exteriores sin fracturarse.

En la construcción de iglesias altas en la Edad Media, estas dos funciones fueron la mayoría de las veces exclusivamente satisfechas por arbotantes; se llegaron a tender dos o tres unos encima de otros. A veces, por su especial forma y composición, fueron particularmente adecuados para estas funciones especiales.

En las fachadas laterales, donde el viento ejerce presión sobre el edificio, las bóvedas son empujadas hacia el lado opuesto; los arbotantes reciben allí este empuje. Se comprende fácilmente que las bóvedas tienen que ser capaces de trasladar este empuje y también, que la armadura de cubierta, con sus cuchillos con maderos a tracción y compresión, colabora a ello. Cuando una iglesia está cubierta con bóvedas de cañón no se puede contar mucho con este traslado, ya que la bóveda de cañón no puede transmitir ninguna, o casi ninguna, fuerza horizontal a los arbotantes. Pero en cambio, una bóveda de crucería, sobre todo si tiene una línea de clave plana, resulta muy adecuada.

El análisis del conjunto de las bóvedas viene a ser lo mismo que la construcción de líneas de empuje en bóvedas y en arbotantes, por lo que se tiene que averiguar tanto si las líneas de empuje permanecen en el núcleo central, como si el empuje en los lados extremos de las secciones, donde la excentricidad es máxima, no supera la máxima tensión admisible en el material.

Este análisis se debe hacer con las bóvedas tanto sin carga de viento como con ella. Eventualmente se tiene que tener también en consideración la carga ejercida por la nieve.

Para todos estos casos tiene que ser posible encontrar una línea de empujes que permanezca dentro del núcleo de los arcos y de las bóvedas y se tiene que asegurar la estabilidad de los estribos o pilares que soportan la bóveda.

La estabilidad de los estribos

Es obligado analizar también la estabilidad de los estribos y de los pilares sobre los que apoya la bóveda. En el arranque de la bóveda, la línea de empujes se continúa en estos muros de apoyo y está influida por su peso, así como por el de la

bóveda con sus sobrecargas eventuales. El último empuje de la línea de empujes, que pasa por el arranque de la bóveda, se tiene que componer con el peso del pilar o del estribo.

La pregunta es, entonces, qué línea de empuje tenemos que elegir para ello. Si los estribos y muros de apoyo ceden porque no ofrecen suficiente resistencia al empuje de la bóveda, se abrirá la línea de clave en la parte inferior, y la junta del arranque en la parte superior, con lo que la línea de empujes discurrirá por el punto más alto de la junta de la clave y por el más bajo de la junta del arranque, de manera que surge, por tanto, una línea de empuje mínimo. Este hecho debe también considerarse en el análisis.

En el caso de que exista la posibilidad de que los puntos de apoyo tiendan a juntarse, podrá surgir una línea de empuje máximo, con lo que el análisis en este caso tendrá que partir de esta línea de empuje máximo (Lám. 136, figs. 2, 3).

Si no se está seguro de esto, o cualquiera de ambos casos es posible; entonces, por seguridad, se hace el análisis de las dos maneras y el sistema de bóvedas se construye de forma que sea estable en ambas circunstancias.

El análisis implica:

1) Comprobar que los estribos no pueden volcar; esto podría ocurrir justo por encima de la cimentación. Se tiene que comprobar que las diferentes fuerzas que actúan sobre el estribo no pueden ocasionar su vuelco.
2) Comprobar que los estribos no pueden deslizar sobre la cimentación.
3) La tensiones calculadas en los extremos de las secciones del estribo no deben superar la máxima tensión admisible del material empleado.

En primer lugar, hay que dibujar el núcleo central de cada sección horizontal y, después, verificar que la línea de empujes pasa en cualquier sección dentro del núcleo. Si esto es así entonces no hay ningún peligro de que el estribo vuelque. En el caso de estribos esbeltos el análisis debe considerar también el problema del pandeo.

5.2 Análisis de bóvedas compuestas: bóvedas de arista o crucería, estrelladas y reticuladas

El reparto de tensiones en los paños de las bóvedas.

Los tramos de las bóvedas no tienen por lo general nunca forma cuadrada. Puesto que las tensiones que actúan en la bóveda se difunden por toda la fábrica, todo el material unido a la bóveda resulta estar bajo tensión.

El ingeniero Sabouret ha realizado el análisis del comportamiento de bóvedas con plantas rectangulares, no cuadradas, de los que resulta que cuando la oblicuidad (en planta) de los paños, esto es de los arcos diagonales, no es demasiado grande, ésta no es ningún inconveniente para un buen reparto de las tensiones. En bóvedas que en planta se ejecutan según una dirección oblicua, las tensiones se reparten regularmente en dicha dirección cuando la oblicuidad no es mayor de 30°. Así, pues, se debe adoptar a partir de esos análisis que también los paños oblicuos con ángulo de base de como máximo 30° colaborarán satisfactoriamente en el reparto de tensiones.

La opinión de que solamente los nervios cruceros son los que soportan la bóveda no es por tanto correcta, aunque sin embargo, en el análisis de las bóvedas nervadas y de arista se parte de esta suposición no exacta. La seguridad es mayor si la contribución que los paños aportan a la estabilidad se desprecia conscientemente.

Se asume que los empujes se transmiten preferentemente en la dirección de mayor pendiente. Esta dirección se podría determinar colocando un cono en la superficie exterior de la bóveda; si se deja suelto, entonces, por la fuerza de la gravedad se colocará en la dirección de mayor pendiente.

La dirección de las juntas tiene poca importancia en el reparto de las tensiones, pero sí la tiene la mayor o menor curvatura que posean los paños y los nervios, así como su peso.

La construcción de las líneas de empuje en los nervios

Como ejemplo de esta construcción, se tratará primero el análisis de una bóveda de arista simple con líneas de clave horizontales, después de lo cual bastará con una breve consideración sobre el análisis del resto de bóvedas con nervios múlti-

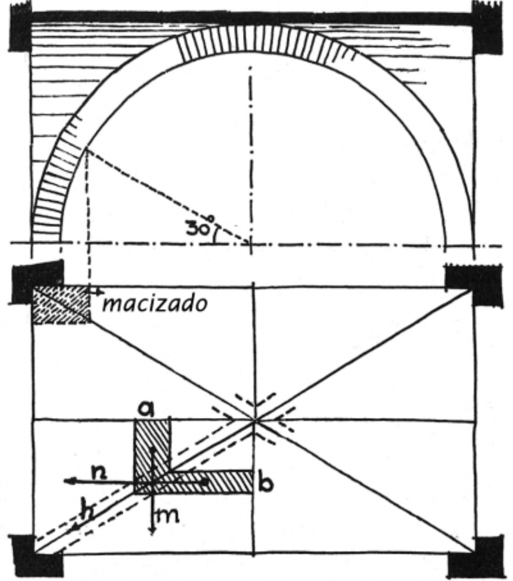
ples. Las bóvedas en rincón de claustro las podemos considerar la mayoría de las veces como bóvedas de cañón apoyadas unas contra otras, de forma que también con esta consideración queda indicado el camino para su análisis. La bóveda de arista a considerar se obtiene por la intersección de dos bóvedas de cañón (Lám.137, fig.1).

Para el análisis se comprueba primero la magnitud y dirección que el empuje de los paños de las bóvedas ejercen sobre los nervios diagonales.

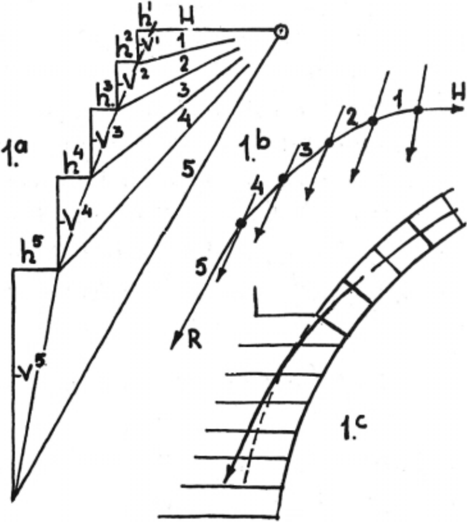
Para ello, se dividen los paños en franjas a ambos lados de la diagonal que sean paralelas a los lados del rectángulo. Cada franja es, por tanto, un arco de una pequeña bóveda de cañón. Se determina a continuación, de la manera usual, el empuje en el arranque de cada banda o arco elemental, ejerciéndose este empuje sobre el arco diagonal. (El peso de la franja está en equilibrio con el empuje dirigido en horizontal en la coronación y con el empuje del arranque sobre el arco diagonal; estas dos fuerzas se cortan mutuamente en punto.)

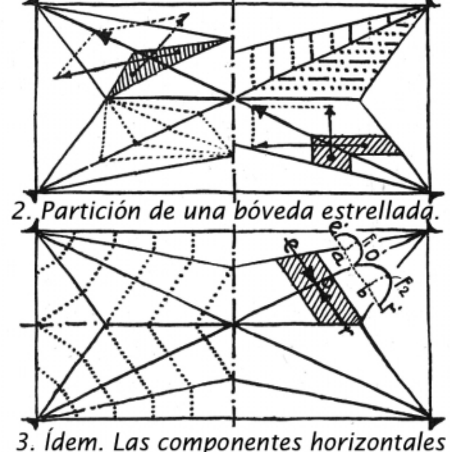
La componente vertical del empuje en el arranque es en ambos lados igual al peso de cada media franja contigua. La magnitud de la componente horizontal se puede determinar fácilmente con ayuda del paralelogramo de fuerzas. Hay que darse cuenta de que esta componente horizontal no está en la misma dirección que la proyección horizontal de la diagonal, de manera que esta componente se debe descomponer en dos fuerzas, de las cuales una actúa en la dirección proyectada de la diagonal y la otra perpendicular a ella. Se busca, entonces, que las dos fuerzas perpendiculares que actúan a ambos del arco diagonal sean aproximadamente iguales, para que se puedan anular mutuamente.

El profesor Landsberg (1909) ha demostrado que esto es así si las flechas o alturas de dos franjas de la bóveda de igual peso (medidas por unidad de superficie en planta), que concurren sobre la arista diagonal, tienen igual altura. Si las franjas en planta no están situadas perpendicularmente entre sí, sino que están situadas en prolongación, entonces las flechas tiene en que estar en relación a los cuadrados de las cuerdas o luces de los arcos de franja. Landsberg también calculó la relación de las alturas de las flechas para otros casos.



1. Bóveda de arista obtenida por intersección de dos bóvedas de cañón.





2. Partición de una bóveda estrellada.

3. Ídem. Las componentes horizontales se anulan aquí dos a dos si: $F_1:F_2 = a:b$ (F_1 y F_2 son las flechas de los pequeños arcos eo y or).

4. Si la componente horizontal de una franja o arco es demasiado grande, se puede reducir dándole mayor curvatura.

1. Análisis de la bóveda de arista de la fig. 1. Se corta la bóveda en franjas, que son pequeños arcos elementales (se ha dibujado la mitad), y se calculan de la forma habitual las reacciones en los arranques. Por ejemplo, a y b son dos de estos arcos. Descomponemos sus reacciones en una componente vertical y otra horizontal. La vertical es el peso del medio arco. Las componentes horizontales n y m se componen a su vez en una fuerza h actuante en la dirección de la diagonal, aproximadamente. Actúan entonces sobre el arco diagonal: 1º. Los pesos de los arcos V^1, V^2, V^3, V^4, V^5 dirigidos verticalmente. 2º. Las fuerzas h^1, h^2, h^3, h^4, h^5 dirigidas horizontalmente. En el polígono de fuerzas 1ª. Estas fuerzas se han sustituido por un sistema de fuerzas 1, 2, 3, 4, 5, H, que se han dibujado, consecutivamente en la fig. 1^b, y en la fig. 1^c dentro del arco diagonal. La línea de empujes debe permanecer dentro del núcleo central de inercia.

2 y 3. Los paños de una bóveda nervada se pueden dividir de diferentes maneras. Hay que procurar que las componentes horizontales de las franjas que concurren en el nervio correspondiente sean casi iguales dos a dos. Las componentes verticales se suman con el peso de los nervios, y se componen con las horizontales en el plano del nervio, dibujándose después, como antes, la línea de empujes en el interior del nervio.

En una bóveda de arista con líneas de clave horizontales y de igual altura, las alturas de las flechas son evidentemente iguales. Un constructor precavido deberá cuidar también de que en las líneas de clave inclinadas o arqueadas las alturas de las flechas, en la medida de lo posible, tengan la misma dimensión. Si esto no ocurre, actuará en cada franja de bóveda una componente horizontal remanente dirigida perpendicularmente al arco diagonal que, por tanto, debido a su transmisión por los paños de la bóveda, ejercerá empujes sobre los arcos de cabeza, que deberán ser capaces de resistirlo.

Esta aparentemente complicada forma de análisis resulta, en realidad, más fácil en la práctica, sobre todo si partimos de que el peso de las bóvedas por unidad de superficie medida en el plano horizontal de proyección es casi el mismo y que, por tanto, lo es el peso de las franjas de tamaños aproximadamente iguales dos a dos. Los empujes en la coronación son para todas las franjas igual de grandes.

En el análisis de las bóvedas de arista y nervadas, en el que las franjas no pueden combinarse de dos en dos de forma tan evidente, se procede sin embargo de forma semejante.

Esto se hace por ejemplo, en las bóvedas de arista con líneas de clave inclinadas o arqueadas, en las bóvedas estrelladas, y en el resto de bóvedas nervadas (Lám.137, figs. 2, 3). Si los paños de la bóveda son largos y estrechos se puede suponer que la mitad del peso de los paños empuja sobre los nervios contiguos y que las fuerzas ejercidas perpendicularmente a los nervios se anulan mutuamente.

La curvatura de los paños y de los arcos puede ser tan grande en estas bóvedas que la coronación de la bóveda sea notablemente más alta que las claves de los arcos formeros y perpiaños, de manera que la bóveda muestre propiedades características de una cúpula.

Para el análisis se parte otra vez del supuesto de que el peso de los paños está soportado exclusivamente por los nervios y que tiene que ser posible construir un haz de líneas de empujes por el núcleo central de los nervios.

Si los paños se dividen en franjas en las que cada una sea un arco o una pequeña bóveda de cañón, entonces pueden ser en planta tanto rectangulares como triangulares, pudiendo apoyar sobre los nervios bajo una ángulo distinto a 90°.

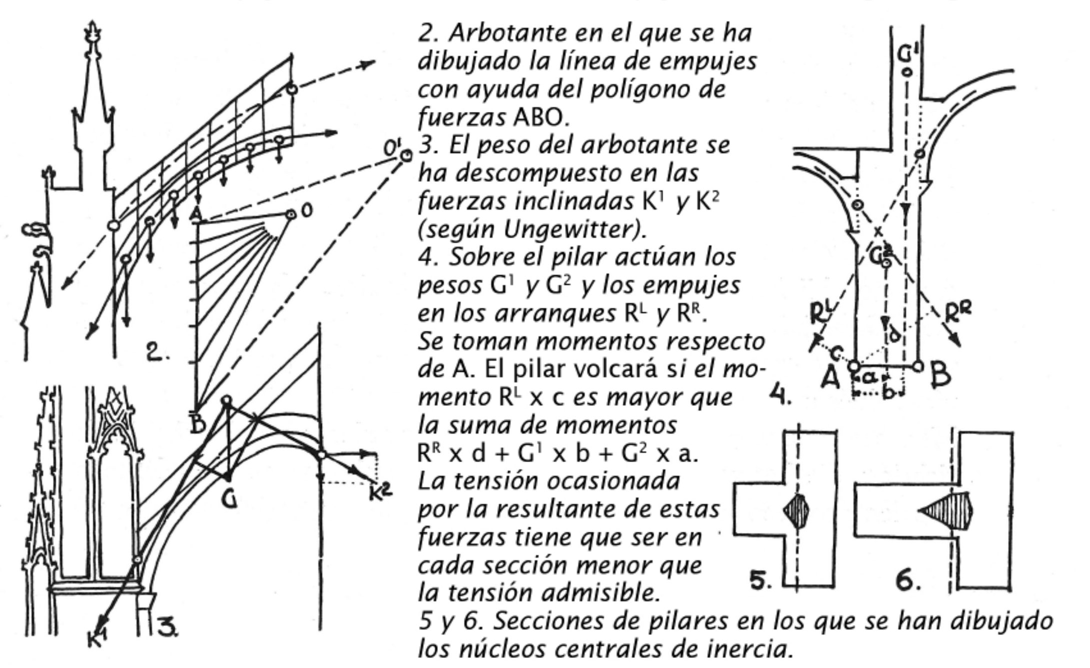
LÁMINA 138. LA INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA POSICIÓN DE LA LÍNEA DE EMPUJES, SEGÚN UNGEWITTER

N.B. Ungewitter considera el efecto de la fuerza del viento de forma diferente a como es usual actualmente.

La línea de clave recta traslada con facilidad las fuerzas horizontales

20m

1. Sección de la catedral de Estrasburgo donde se han dibujado las líneas de empuje: – – – Líneas de empuje sin viento, · · · Líneas de empuje con viento. (según Ungewitter).



2. Arbotante en el que se ha dibujado la línea de empujes con ayuda del polígono de fuerzas ABO.

3. El peso del arbotante se ha descompuesto en las fuerzas inclinadas K^1 *y* K^2 *(según Ungewitter).*

4. Sobre el pilar actúan los pesos G^1 *y* G^2 *y los empujes en los arranques* R^L *y* R^R. *Se toman momentos respecto de* A. El pilar volcará s*i el momento* R^L x c *es mayor que la suma de momentos* $R^R \times d + G^1 \times b + G^2 \times a$. *La tensión ocasionada por la resultante de estas fuerzas tiene que ser en cada sección menor que la tensión admisible.*

5 y 6. Secciones de pilares en los que se han dibujado los núcleos centrales de inercia.

Si las franjas son de tamaño desigual, lo que no es nada favorable, entonces las componentes horizontales de los empujes en el arranque no se anulan mutuamente. En este caso se puede obtener el equilibrio deseado modificando las flechas de los arcos, o sea, tomando la franja más ligera algo más rebajada que la de mayor peso en el otro lado. Las reacciones del arranque se descomponen otra vez en una componente horizontal y otra vertical (Lám.137, fig. 4).

A la componente vertical se tiene que añadir el peso de la parte correspondiente de los nervios; la componente horizontal se trata tal como más arriba se ha indicado para la bóveda de arista.

Para que las líneas de empuje puedan estar contenidas correctamente en el núcleo central del nervio, es deseable que éste sea adecuado para la inclusión de una línea de empujes (más o menos) parabólica, tal como por ejemplo en el arco apuntado o en el arco escarzano. Los senos de los arranques de la bóveda tienen que estar bien rellenos para que la línea de empujes permanezca más fácilmente dentro del núcleo en la zona del arranque. Es evidente que es conveniente, a ser posible, que este relleno se realice con los mismos materiales con los que se ha ejecutado la bóveda, ya que la línea de empujes se transfiere del arco al punto de apoyo y por tanto no es deseable un módulo de elasticidad distinto, o menor rigidez en el material de la bóveda cerca del apoyo.

5. 3 Análisis de cúpulas

En las cúpulas se debe de diferenciar entre cúpulas nervadas y cúpulas de cáscara. En las cúpulas nervadas (de gajos o gallonadas) se supone que los nervios son los soportes de las bóvedas y el análisis recae en la comprobación de que las líneas de empuje permanezcan dentro de los núcleos de los nervios; si esto no es así, los nervios se tienen que, o bien reforzar o bien colocarse en otra posición.

En las cúpulas de cáscara, bien no se colocan nervios, o bien pueden ser obviados, pues sirven solamente para la rigidización de la cáscara de la cúpula.

Cuando se colocan nervios tenemos que preguntarnos continuamente cual es la función y el objetivo de dichos nervios, ya que no siempre conllevan un refuerzo de la cúpula de cáscara.

En las cúpulas de cáscara, que tienen pequeño espesor en relación con la luz, se supone que las tensiones se reparten uniformemente en el espesor de la sección.

Consideremos una sección horizontal I-I perpendicular al eje de la cúpula (Lám 139, fig. 1). El material bajo la sección tendrá que ejercer una serie de fuerzas internas sobre el material situado por encima, de las cuales la resultante estará en equilibrio con la resultante de todas las fuerzas exteriores sobre la parte de la cúpula por encima de la sección, por ejemplo, el peso propio de la cúpula, el de la linterna, las sobrecargas de la nieve, el viento, etc.

A la inversa, el material por encima de la sección ejercerá fuerzas sobre el situado debajo iguales pero en dirección opuesta a las más arriba citadas fuerzas internas.

Supongamos que el peso de la cúpula, la linterna y las sobrecargas producen una carga uniforme por unidad de longitud igual a P^I sobre el perímetro, que va dirigido en dirección vertical sobre esta sección (Lám. 139, fig. 2).

Esta fuerza vertical P^I se pueden descomponer en dos direcciones principales: las componentes son P_s^I y P_g^I. Consideremos ahora una segunda sección II-II, paralela a la sección I-I, y situada a una distancia muy pequeña de ésta. Estas dos secciones aíslan un anillo extremadamente delgado de la cúpula. La sección de este anillo está representada en la fig.3, donde se ha dibujado con el espesor muy agrandado.

Si consideramos la cúpula del lado inferior de este anillo, entonces se ejerce allí una fuerza vertical que es igual a P^I aumentado con el peso del anillo. A esta fuerza la llamamos P^{II}.

El anillo entre las secciones tiene entonces que estar en equilibrio bajo el efecto de las fuerzas P^I y P^{II} o de sus componentes, P_s^I, P_s^{II}, P_g^I y P_g^{II}.

Las fuerzas P_s originan empujes en la dirección de la tangente a la cúpula; las fuerzas P_g van dirigidas al centro del anillo (son horizontales) y producen una fuerza de tracción o de compresión. Esta fuerza se puede determinar para cada anillo de la siguiente forma:

Las fuerzas P_g actúan sobre toda la superficie del anillo (Lám. 139, figs. 4 y 5). Si damos un corte por un diámetro AB, entonces, las fuerzas a ambos lados de este diámetro ejercen una tracción o una compresión sobre el anillo (es decir, las fuerzas P_g a la derecha o a la izquierda del diámetro ejercen tracción o com-

presión en A y en B). El esfuerzo de tracción en A es igual que en B, de manera que para determinar la magnitud de esta fuerzas nos basta con considerar la influencia de las fuerzas P_g ejercidas sobre un cuarto de la circunferencia del anillo.

La fuerza P_g, es una fuerza por unidad de longitud; por tanto, sobre un elemento diferencial de anillo ds actúa una fuerza $P_g ds$. Esta fuerza tiene una componente normal a la dirección del diámetro AB que vale $P_g\ ds \cos\alpha = P_g\ dy$. La fuerza en A se obtiene sumando estas fuerzas elementales sobre un cuarto del contorno, es decir:

$$A = \int_o^y P^g \cdot dy = P^g \int_o^y dy = P^g \cdot y \qquad (1)$$

Consideramos ahora la sección del disco obtenido por los dos cortes dados a muy poca distancia uno del otro.

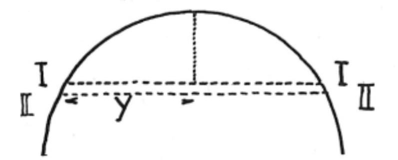
P_g^I y P_g^{II}, fig. 3, tienen direcciones opuestas y ocasionan por tanto, fuerzas anulares opuestas. La diferencia de magnitud de estas fuerzas anulares tiene que ser absorbida por una tracción o una compresión en el anillo.

Si P_g^{II} es mayor que P_g^I entonces surge una tracción; esto es lo que ocurre en la parte inferior de una cúpula. En el caso opuesto aparece una compresión, y esto sucede en la parte superior de la cúpula.

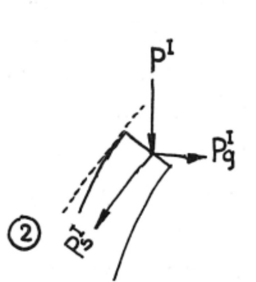
Si la cúpula se continúa tanto hacia abajo que la tangente llega a hacerse vertical (por ejemplo en una semiesfera), entonces $P_g = 0$ y P_s toma dirección vertical, de manera que no se ejerce ninguna fuerza lateral en el arranque de la cúpula. Hay que tener en cuenta que se tienen que poder absorber las tensiones internas de tracción que actúan en la parte baja de la cúpula.

Cuando la tangente a la cúpula en el arranque (en la dirección del meridiano), no tiene una posición vertical y el apoyo sólo puede absorber fuerzas verticales, entonces podemos descomponer esta reacción de apoyo en fuerzas horizontales, es decir que discurran paralelas al suelo. Estas últimas fuerzas no pueden ser absorbidas sin más por la cúpula, sino que darán lugar localmente a una gran fuerza anular en la cúpula contra la que se tienen que tomar precauciones.

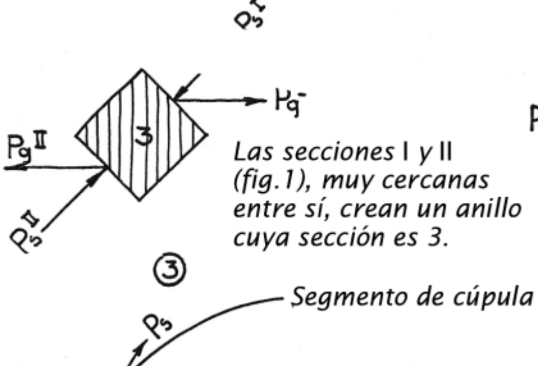
LÁMINA 139. ANÁLISIS ESTÁTICO DE CÚPULAS



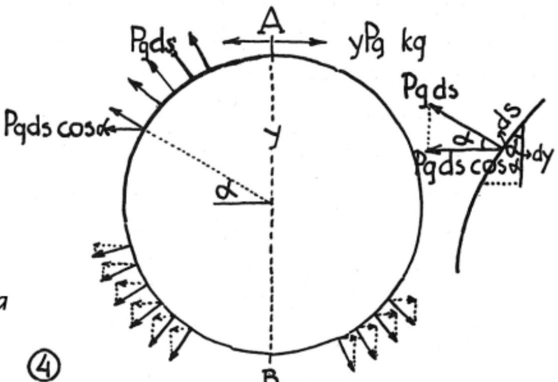
① I-I *proporciona un corte horizontal perpendicular al eje de la cúpula.*



El peso P^I *de la parte superior de la cúpula se descompone en las fuerzas* P_s^I *y* P_g^I*.*



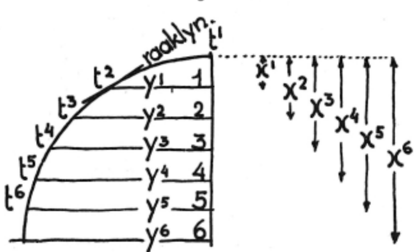
③ *Las secciones* I *y* II *(fig.1), muy cercanas entre sí, crean un anillo cuya sección es 3.*



④ *En la parte exterior de la sección radial de la cúpula actúan fuerzas* P_g *por unidad de longitud, es decir,* $P_g ds$ *por elemento* ds*.*
La componente perpendicular a AB, $P_g ds \cos\alpha = P_g dy$ *(*$dy = ds \cos\alpha$*). Por tanto la fuerza anu*
en A = $\int_0^y P_g\, dy = P_g\, y$.

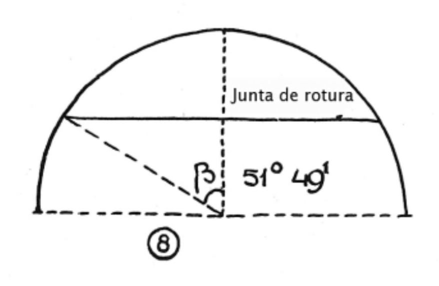
Segmento de cúpula

⑤ *La reacción de apoyo* P_y *se descompone en las fuerzas* P_g *y* P_s*.*



⑥ *Sección meridiana de una cúpula esférica.*

⑦ *Los pesos* P^1, P^2, *etc. de los casquetes esféricos obtenidos por* 1, 2, 3, *etc (fig.6) se descomponen en fuerzas* S^1, S^2, *etc. según las tangentes en* t^2, t^3, *etc. y en fuerzas* H^1, H^2, *etc. La diferencia entre* H^1 *y* H^2*;* H^2 *y* H^3 *es absorbida por tensiones internas en la cáscara de la cúpula. Éstas son tensiones de compresión si* $H^1 < H^2$, *etc. y tensiones de compresión si* $H^3 > H^4 > H^5$, *etc. El límite se sitúa en el ángulo* β *= 51º49' (fig.8). En 6 no hay fuerza horizontal* H^6*.*



⑧

Si el peso total de la cúpula (todas las cargas incluidas) es P por unidad de longitud del contorno, entonces la fuerza horizontal igualmente repartida a lo largo de toda la sección P_g y la fuerza obtenida por suma de estas fuerzas valdrá P_g *y* ecuación (1), siendo *y* el radio de la cúpula en el arranque.

Para poder absorber esta fuerza anular será necesario colocar un fuerte armado. En la actualidad, la mayoría de las veces se coloca para esta finalidad un zuncho de acero o de hormigón armado.

En las antiguas cúpulas, los apoyos frecuentemente se realizaban con una serie de pesados contrafuertes, de forma que no eran necesarios estos zunchos anulares resistentes. Cuando la cúpula está en la parte inferior perforada por aberturas, entonces esta parte inferior ya no actúa como una cúpula y es por tanto necesario situar un sistema de contrafuertes y nervios reforzados que sirvan de apoyo a la parte contigua de la cúpula. Santa Sofía es un buen ejemplo de ello.

Una cúpula se puede analizar gráficamente de forma sencilla realizando diferentes secciones por planos horizontales a distancias x^1, x^2, x^3, x^4, etc. de la clave, siendo los radios correspondientes de las secciones de la cúpula y^1, y^2, y^3, y^4, etc. (Lám. 139, figs. 6, 7).

El peso total de los casquetes de cúpula por encima de cada sección lo denominaremos P^1, P^2, P^3, P^4, etc. Colocamos estos pesos, a una cierta escala de fuerzas, a partir de un mismo vértice, y descomponemos después cada uno en dos componentes: una la dirección de la tangente a la sección correspondiente (direcciones t^1, t^2, t^3, t^4, etc.) y la otra en dirección horizontal.

Se forma un polígono de fuerzas donde las líneas S^1, S^2, S^3, S^4, etc., representan las fuerzas de compresión en la cúpula en la dirección de la tangente, y las fuerzas horizontales H^1, H^2, H^3, H^4, etc., las fuerzas anulares.

Las diferencias entre H^1, H^2, etc. representan las fuerzas anulares locales a absorber; éstas originan, por tanto, comprensiones en la parte superior de la cúpula y tracciones en la parte inferior.

La transición de la zona de compresión hacia la zona de tracción se denomina junta de rotura de la cúpula. Gráficamente se podría llegar a determinar su posición de forma muy aproximada colocando cada vez más secciones sucesivas.

En una cúpula esférica de espesor uniforme, la junta de rotura se sitúa en una sección radial obtenida por una línea que pasé por el centro y se haga girar bajo una ángulo de 51° 49’ con el eje de la esfera (Lám.139, fig.8).

La altura a la que se sitúa la junta de rotura varía en función de la carga de la cúpula.

Si se hace una apertura en la coronación de la cúpula, un óculo, o se realiza la parte alta de la cúpula con un material ligero, entonces la junta de rotura se desplaza hacia abajo, y las tensiones de tracción aparecen en una parte más baja de la cúpula, lo que naturalmente es más favorable. Si por el contrario la cúpula está cargada con una linterna, entonces la junta de rotura sube y la parte en donde actúan tensiones internas de tracción se hace mayor, lo que es desfavorable.

Es de desear que, en la medida de lo posible, estas tensiones de tracción queden neutralizadas. Esto puede hacerse por la colocación de zunchos anulares en torno a la cúpula, comenzando allí donde aparecen las tracciones, es decir en la junta de rotura.

En las cúpulas de cáscara sobre planta elíptica se obtiene un reparto de tensiones distinto que en las de planta circular. Las tensiones anulares pueden alcanzar en este caso valores muy grandes. Por esta razón, en general se evitará que tales cúpulas se realicen como cúpulas de cáscara.

Bibliografía

Obras generales

Aubert, Marcel. 1932. *Nouvelle Histoire universelle de l'Art*. 2 vols. Paris: Firmin-Didot.

Boniver, Denis. 1937. *Der Zentralraum. Studien uber Wesen und Geschichte*. Stuttgart: Julius Hoffmann.

Breymann, Gustav Adolf. 1849!54. *Allgemeine Bau-Konstruktions-Lehre mit besonderer Beziehung auf das Hochbauwesen. I Theil: Konstructionen in Stein*. Stuttgart: Hoffmann. [Numerosas ediciones posteriores. Nueva ed. revisada por O. Warth, Leipzig, 1896.]

Choisy, Auguste. 1899. *Histoire de l'Architecture*. Paris: Gauthier-Villars.

Cloquet, L. 1898. *Traite d'Architecture. Tome I. Maconnerie. Murs,voûtes, arcades*. Paris, Liège: Librairie Polytechnique Baudry.

Dunn, William. 1908. The principles of dome construction. *Architectural Review*. 23: 63B73; 108–112.

Derand, François. 1743. *L'architecture des voûtes ou l'art des traits et coupe des voûtes*. Paris:Cailleau.

Ellis, George. 1914. *Modern practical Carpentry for the use of Workmen, Builders, Architects and Engineers*. 2ª ed. London: B.T. Batsford. Cimbras para bóvedas y cúpulas.

Esselborn, Karl. 1908–1912. *Lehrbuch des Hochbaues*. 2 vols. Leipzig: Engelmann. [Trad. Esp. *Construcción de edificios*. Barcelona: Gustavo Gili, 1928.]

Evers, Henry. 1911. *De Architectuur in hare Hoofdtijdperken*. Groningen: Wolters.

Fergusson, James. 1855. *The Illustrated Hanbook of Architecture*. London: J. Murray.

——. 1865–67. *A history of architecture in all countries from the earliest times to the present day*. 3 vols. London: J. Murray.

Fergusson, James. 1873. *History of the modern Styles of Architecture*. London: J. Murray.

Fletcher, Bannister F. 1905. *A history of architecture on the comparative method, for the student, craftsman, and amateur*. 5ª ed. London: B.T. Batsford. [Trad. esp. *Historia de la Arquitectura según el método comparado*. Madrid: Ediciones Giner, 1985.]

Frauenholz, Wilhelm. 1875. *Baukonstruktionslehre für Ingenieure. Band I: Steinkons-truktionen*. München: Ackermann.

Frick, Otto. 1927. *Handbuch der Steinkonstruktionen, einschliesslich des Beton- und Grundbaues*. Berlin: Geissler.

Goethals, Emile. 1949. *Bogen, Gewelven, Koepels / Arcs, voûtes, coupoles*. 2 vols. Brussel: Uitgaven Kunst van Bouwen /Art de Bâtir.

Gosset, Alphonse. 1889. *Les Coupoles d'Orient et d' Occident. Étude historique, théorique et pratique.* Paris: A. Levy.

Gottgetreu, Rudolph. 1880. *Lehrbuch der Hochkonstruktionen. Erster Teil: Maurer- und Steinmetzarbeiten (Stein-Konstruktionen).* Berlin: Ernst & Korn.

Guadet, Julien. 1901–1904. *Eléments et Théorie de l'Architecture*. 4 vols. Paris: Librairie de la construction moderne.

Hess, Friedrich. 1943. *Konstruktion und Form im Bauen*. Stuttgart: Hoffmann. [Trad. esp. *Construcción y forma*. Barcelona: Gustavo Gili, 1954.]

Isabelle, E. 1863. *Les Edifices circulaires et les dômes*. Paris: Firmin Didot.

——. 1863. *Paralléle des salles rondes de l'Italie*. Paris: Librairie d'Architecture de A. Lévy.

Jager, B. de. 1919. *Getoogde Boog, getoogd Kozijn en Raam op ronden Hoek*. Amsterdam: Van Mantgem en de Does, 1919. (Polytechnische Bibliotheek n. 21).

Jellema, R., M. C. A. Meischke, y J. A. Muller. 1949. *Bouwkunde voor het middelbaar technisch onderwijs*. Delft: Waltman.

Körner, Carl. 1901. *Gewölbte Decken.* (*Handbuch der Architektur, Teil 3, Band 2, Heft 3,b*). Stuttgart: Arnold Bergsträsser.

Lömpel, Heinrich. 1913. *Die Monumentale Tonne in der Architektur*. München: Wolf.

Mäkelt, Arthur. 1942. Der Bau grosser gemauerter Kuppelgewölbe. *Zentralblatt der Bauverwaltung vereinigt mit Zeitschrift für Bauwesen*. 35/37: 409–417.

Opderbecke, Adolf. 1906 [1900]. *Der Maurer. Das Handbuch des Bautechnikers, 2 Band.* Leipzig: Voigt.

Rondelet, Jean Baptiste. 1842. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. 9ª ed. Paris: Chez Firmin Didot. [1ª ed. Paris, 1802–10.]

Rouché, Eugène y Charles Brisse. 1893. *Coupe des pierres, précédée de principes du trait de stéréotomie* (*Encyclopédie des Travaux Publics*). Paris: Baudry et Cie.

Russel, Sturgis y A. L. Frothingham. 1906–1915. *A History of Architecture*. 4 vols. London, New York: B. T. Batsford, Baker & Taylor Co.

Sattler, Carl. 1941. Leichtgewölbe in Italien. *Das Bauwerk,*1: 1–5, 37–41.

Scheltema, P. H. s.a. *De Metselaar. Practisch Handboek voor Bouwkundigen en Ambachtslieden, omvattende nagenoeg alle, bij de uitvoering van bouwwerken, voorkomende werkzaamheden, gereedschappen, materialen en hulpmiddelen.* Rotterdam: D. Bolle. [Original de G. A. Smit, completamente renovado y con importante ampliación de P.H. Scheltema.]

Schröder, Max. 1911. *Die Gewölbe; ihr Wesen, Ihre Gestalt und ihre Bau; ein Lehrbuch für den Unterricht an Bauschulen und für den Selbstunterricht. Teil 1. Hausgewölbe*. Strelitz: Hittenkofer.

Vermeulen, F. A. J. 1931. *Handboek tot de geschiedenis der Nederlandsche Bouwkunst*. 2 vols. Gravenhage: Nijhoff.

Viollet-le-Duc, Eugène. 1854–68. *Dictionnaire raisoné de l'architecture française du XIe au XVIe Siècle*. París: A. Morel.

Wanderley, Germano. 1895. *Die Konstruktionen in Stein.* (*Handbuch der Baukonstruktionslehre 2*) 3ª ed. Fulda: Arnd.

Wattjes, J. G. 1926. *Constructie van Gebouwen, deel 3*, *Vloeren, plafonds, gewelven en trappen.* Amsterdam: Kosmos.

Wild. 1856. Über die toscanischen Gewölbe, "Volterrane" genannt. *Zeitschrift für Bauwesen* 6: 182–183.

Zwiers, L. y J. P. Mieras. 1918. *Handboek der burgerlijke Bouwkunde, deel 2, Steen-constructies*. Amsterdam: Van Mantgem en de Does.

Imperio romano

Choisy, Auguste. 1873. *L'art de bâtir chez les Romains*. Paris: Librairie générale de l'architecture et des travaux publics Ducher et cie. [Trad. esp. *El arte de construir en Roma*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 1999.]

Canina, Luigi. 1848–1856. *Gli edifizj antichi dei contorni di Roma cogniti per alcune reliquie discritti e demonstrati nellá loro intera architettura*. 6 vols. Roma: Bertinelli.

Durm, Josef. 1905. *Die Baukunst der Etrusker und Römer. (Handbuch der Architektur, Teil 2, Band 2)*. 2ª ed. Stuttgart: Kröner.

Giovannoni, Gustavo. 1925. *La Technica della costruzione presso i Romani*. Roma: Societa Editrice d'Arte Illustrata.

Glück, Heinrich. 1933. *Der Ursprung der römischen und abendländischen Wölbungsbaues*. Wien: Krystall.

Rivoira, G. T. 1925. *Roman architecture and its principles of construction under the empire. With an appendix on the evolution of the dome up to the XVII century*. Oxford: Clarendon Press.

Terenzio, Alberto. 1933. La restauration du Panthéon de Rome. En: *La conservation des monuments d'art et d'histoire*, 280–285. Paris: Office International des Musées.

Oriente

Baltrusaitis, Jurgis. 1936. *Le problème de l'ogive et l'Arménie*. Paris: Leroux.

Benoit, François. 1912. *L'Architecture. L'orient mediéval et moderne. (Manuels d'Histoire de l'Art)*. Paris: H. Laurens.

Casson, S. 1929. The underground cisterns of Constantinople. *Architectural Review*, 61: 167–171.

Choisy, Auguste. 1883. *L'art'de bâtir chez les Byzantins*. Paris: Libraire de la Société anonyme de publications périodiques. [Trad. esp. *El arte de construir en Bizancio*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 1997.]

——. 1904. *L'art de bâtir chez les Égyptiens*. 1904. Paris: Edouard Rouveyre, 1904. [Trad. esp. *El arte de construir en Egipto*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 2006.]

Dieulafoy, Marcel. 1884–1885. *L'art antique de la Perse; Achéménides, Parthes, Sassanides*. 5 vols. Paris: Librairie Centrale d'Architecture.

Diez, Ernst. 1923. *Persien, Islamische Baukunst in Churasan*. Hagen: Folkwang.

Ebersolt, Jan. 1934. *Monuments d'Architecture Byzantine et Décoration. (Histoire de l'art byzantin)*. Paris: Éditions d'Art et d'Histoire.

Fergusson, James, James Bargess y R. Phené Spiers. 1910. *History of Indian and Eastern Architecture*. London: Murray.

Franz-Pascha, Julius. 1887. *Die Baukunst des Islam. (Handbuch der Architektur, Teil II, Band 3, Heft II)*. Darmstadt: Arnold Bergsträsser.

Gosset, Alphonse. 1899. *Les coupoles d'Orient et d'Occident; étude historique, théorique et pratique*. Paris: Lévy.

Gurlitt, Cornelius. 1907, 1912. *Die Baukunst Konstantinopels*. Berlin: Wasmuth.

Hamilton, J. Arnott. 1933. *Byzantine Architecture and Decoration*. 1933. London: Batsford.

Havell, Ernest B. 1927. *Indian Architecture*. London: John Murray.

Holtzinger, Heinrich. 1898. *Die Sophienkirche und verwandte Bauten der Byzantinischen Architektur.* Berlin: Spemann.

Holtzinger, Heinrich. 1899. *Altchristliche und Byzantinische Baukunst. (Handbuch der Architektur, Teil II, Band 3, Heft I).* Berlin: Arnold Bergsträsser.

La Roche, Emanuel. 1921–1922. *Indische Baukunst*. 3 vols. München: Bruckmann.

Perrot, Georges y Charles Chipiez. 1885. *Histoire de l'art dans l'Antiquité. Vol. 3. Phénicie, Cypre.* Paris: Hachette.

Prisse d'Avennes. Émile. 1877. *L'Art arabe d'aprés les monuments du Kaire. Depuis le VIIe siécle jusqu'a la fin du XVIIIe*. 3 Vols. Paris: Morel.

Reuter, Oscar. 1910. *Das Wohnhaus in Bagdad und anderen Städten des Irak. (Beiträge zur Bauwissenschaft. Heft 16).* Berlín: Wasmuth.

Reynolds, Edwin F. 1909. Imperial Mosques of Constantinople. *The Architectural Review,* Part I, February, 71–81; Part II, May, 219–232.

Rosintal, Josef. 1912. *Pendentiefs, Trompen und Stalaktiten. Beiträge zur Kenntnis der islamischen Architektur*. Leipzig: Hinrichs. [Trad. franc. *Pendentifs, trompes et stalactites dans l'architecture orientale*. Paris: Geuthner, 1928.]

Rosintal, Josef. 1937. *Le réseau forme intermédiaire perse inconnue jusqu'à présent*. Paris: P. Geuthner.

Saladin, H. 1907. *Manuel d'art musulman. 1. L'architecture.* Paris: Picard.

Salzenberg, W. 1854. *Alt Christliche Baudenkmale von Constantinopel vom V bis XII Jahrhundert*. Berlin: Ernst & Korn.

Sarre, Friedrich. 1901–1910. *Denkmäler persischer Baukunst; geschichtliche. Untersuchung und Aufnahme Muhammedanischer Backsteinbauten in Vorderasien und Persien*. 3 vols. Berlin: Wasmuth.

Strzygowski, Josef. 1918. *Die Baukunst der Armenier und Europa*. 1918. Wien: Schroll.

——. 1929. *Die Altslavische Kunst.* Augsburg: Filser.

——. 1930. *Asiens bildende Kunst in Stichproben, ihr Wesen und ihre Entwicklung: ein Versuch*. Augsburg: Filser.

Verneilh, M. F. de. 1851. *L'Architecture Byzantine en France, Saint Front de Périgueux et les Eglises à Coupoles de l'Aquitaine*. Paris: Didron.

Wulff, Oskar. 1914. *Altchristliche und Byzantinische Kunst. (Handbuch der Kunstwissenschaft)*. Berlin: Athenaion.

Wilde, Hans. 1909. *Brussa: Eine Entwickelungsstätte Türkischer Architektur in Kleinasien unter den ersten Osmanen.* Berlin: Wasmuth.

La edad media

Aubert, Marcel. 1934. Les plus anciennes croisées d'ogives; leur rôle dans la construction. *Bulletin Monumental* 93: 5–67, 137–237.

Abraham, Pol. 1934. *Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval*. París: Vicent Fréal.

CCC. 1939. Les données plastiques et fonctionelles du problème de l'ogive. *Recherche* 1: 29–51.

Benoit, François. 1934. *L'architecture: L'Occident médiéval romano-gothique et gothique*. Paris: H. Laurens.

Bisanz, Gustav. 1888. Studie über ein Zellengewölbe. *Allgemeine Bauzeitung* 53: 30–31.

Bond, Francis. 1905. *Gothic architecture in England*. London: Batsford.

CCC. 1912. *The cathedrals of England and Wales*. London: Batsford.

Clasen, Karl. Heinz. 1930. *Die Baukunst des Mittelalters. Die gotische Baukunst. (Handbuch der Kunstwissenschaft).* Wildpark-Potsdam: Athenaion.

Dehio, Georg Gottfried. 1919–34. *Geschichte der Deutschen Kunst*. 4 Vols. Berlin: De Gruyter.

Dehio, Georg Gottfried y Gustav von Bezold. 1884–1901. *Die Kirchliche Baukunst des Abendlandes.* Stuttgart: Cotta.

Frankl, Paul. 1926. *Die frühmittelalterliche und Romanische Baukunst. (Handbuch der Kunstwissenschaft)*. Wildpark-Potsdam: Athenaion, 1926.

Guadet, Julien. 1902. *Eléments et Théorie de l'Architecture Tome III. Les Eléments de la Composition. Les Eglises voûtées.* Paris: Librairie de la construction moderne.

Hasak, Max. 1913. *Der Kirchenbau des Mittelalters. (Handbuch der Architectur Teil III, Band 4, Heft 3*). 2ª ed. Leipzig: Gebhardt.

Keuller, L. A. J. 1918–1919. Koorsluitingen, *Bulletin van de Nederlandse Oudheidkundige Bond*. 230–242 (1918), 153–168 (1919).

Kömstedt, Rudolf. 1914. *Die Entwickelung des Gewölbebaues in den Mittelalterlichen Kirchen Westfalens*. Strassburg: Heitz.

Lasteyrie, Robert de. 1912. *L'architecture religieuse en France à l'epoque eomane. Ses origines, son développement*. Paris: Picard, 1912.
Lasteyrie, Robert de y Marcel Aubert. 1926–1927. *L'architecture religieuse en France à l'epoque gothique*. 2 vols. Paris: Picard.
Puig i Cadafalch, Josep. 1935. *La Géographie et les origines du premier Art Román*. Paris: Laurens.
Rehfuss, Erwin O. 1922. *Hans Felder, ein Spätgotischer Baumeister*. Innsbruck: Wagner.
Rey, Raymond. 1925. *La cathédrale de Cahors et les origines de l'architecture à coupoles d'Aquitaine*. Paris: Laurens.
Rivoira, G. T. 1910. *Lombardic Architecture. Its origin, development and derivates*. 2 vols. London: Heinemann.
Sabouret, Victor. 1928. Les voûtes d'arêtes nervurées. Rôle simplement décoratif des nervures. *Le Génie Civil*, 92: 205–209.
——. 1934. L'évolution de la voûte romane du milieu du XIe siécle au début du XIIe. *Le Génie Civil*, 104: 240–243.
Schäfer, Karl. 1885. Der Spitzbogen und seine Rolle im Mittelalterlichen Gewölbebau. *Zentralblatt der Bauverwaltung* 5: 290–302.
Schulze, Konrad Werner. 1939. *Die Gewölbesysteme im Spätgotischen Kirchenbau in Schwaben von 1450 bis 1520*. Reutlingen: Gryphius.
Ungewitter, Georg Gottlob y Karl Mohrmann, 1901–1903. *Lehrbuch der gotischen Konstruktionen*. 4ª ed. 2 vols. Leipzig: H. Tauchnitz.
Viollet-le-Duc, Eugène. 1854–68. *Dictionnaire raisoné de l'architecture française du XIe au XVIe Siècle*. París: A. Morel.
——. 1863–1872 *Entretiens sur l'architecture*. 2 vols. Paris: A. Morel.
Ward, Clarence. 1915. *Mediaeval Church Vaulting*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
Witting, Felix. 1904. *Westfranzösische Kuppelkirchen*. Strassburg: Heitz.
Weise, Georg. 1933. *Studien zur spanischen Architektur der Spätgotik*. Reutlingen: Gryphius.

Renacimiento y barroco

Barman, Christian. 1925. *The Danger to St. Paul's*. London: Jonathan Cape.
Burckhardt, Jacob y Heinrich Holtzinger. 1912. *Geschichte der Renaissance in Italien*. 5ª ed. Esslingen: Neff.
Brinckmann, Albert Erich. 1915. *Baukunst des 17 und 18 Jahrhunderts in den romanischen Ländern*. *(Handbuch der Kunstwissenschaft.)*. Berlin: Athenaion.
Durm, Josef. 1887. Zwei Groszkonstruktionen der italienischen Renaissance. Die Kuppel des Domes in Florenz. Die Kuppel der Peterskirche in Rom. *Zeitschrift für Bauwesen* 37: 353–74, 481–500.
——. 1902. Grosskonstruktionen der italienischen Renaissance. Die Kuppel der Maria dell'Umiltá in Pistoja. Die Kuppel der Santa Maria di Carignano. *Zeitschrift für Bauwesen* 52: 13–20, 161–72.

——. 1914. *Die Baukunst der Renaissance in Italien (Handbuch d. Architektur. Teil 2. Band. 5)*. 2ª ed. Leipzig: Gebhardt.

Espie, Félix-Francois d'. 1754. *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles, ou Traité sur la construction des voûtes, faites avec des briques et du plâtre, dites voûtes plates…* Paris: Duchesne.

Fabriczy, Cornelius von. 1892. *Filippo Brunellesco. Sein Leben und seine Werke*. Stuttgart: Cotta.

Geymuller, Heinrich von. 1901. *Die Baukunst der Renaissance in Frankreich. (Handbuch der Architektur, Teil II, Band 6, Heft 2)*. Stuttgart: Bergsträsser.

Gurlitt, Cornelius. 1888. *Geschichte des Barockstiles, des Rococo und des Klassicismus in Belgien, Holland, Frankreich, England. (Geschichte der neueren Baukunst, Bd. 5, Abt. 2, Tl. 1)*. Stuttgart: Ebner und Seubert, 1888.

Harvey, William. 1925. *The preservation of St. Paul's Cathedral and other famous Buildings*. London: Architectural Press.

Hauttmann, Max. 1921. *Geschichte der kirchlichen Baukunst in Bayern, Schwaben und Franken, 1550–1780*. München: Verlag für Praktische Kunstwissenschaft F. Schmidt.

Knapp, Fritz. 1937. *Balthasar Neumann: der grosse Architekt seiner Zeit*. Bielefeld: Velhagen und Klasing.

Letarouilly, Paul. 1840–1866. *Édifices de Rome moderne ou Recueil des palais, maisons, églises, couvents et autres monuments publics et particuliers les plus remarquables de la ville de Rome*. Paris: Didot.

——. 1882. *Le Vatican et la Basilique de Saint-Pierre de Rome. (Monographie mise en ordre et complétée par M. Alphonse Simil)*. Paris: Morel

Macartney, Mervyn. 1908. The present condition of St. Paul's Cathedral. *Journal of the Royal Institute of British Architects* 15: 53–74.

Rondelet, Jean Baptiste. 1797. *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon français*. Paris: Du Pont, 1797.

Seldmaier, Richard y Rudolf Pfister. 1923. *Die fürstbischöfliche Residenz zu Würzburg*. 2 vols. München: Müller.

Schubert, Otto. 1908. *Geschichte des Barock in Spanien (Geschichte der neueren Baukunst 8)*. Esslingen: Neff Series.

Scott, Leader. 1901. *Filippo di ser Brunellesco*. London: George Bell and Sons.

Strack, Johann Heinrich. 1877–1881. Centralkirchenbauten des 15. und 16. Jahrhunderts in Ober-Italien. *Zeitschrift für Bauwesen*, 27–31. (27: 219–234, láms. 35–42; 28: 15–22, 157–162, 519–524, láms. 11, 12, 24–26; 29: 47–50; 30: 21–28, láms. 21–24; 31: 15–18, láms. 10–12.)

Thunnissen, H. J. W. 1924. De St. Pieterskerk te Rome. *Klei. Tijdschrift aan Architectuur en Bouwtechniek*, 16: 211–17, 223–28, 235–38, 247–53.

——. De ST. Paul´s Kathedraal te Londen. *Klei.. Tijdschrift aan Architectuur en Bouwtechniek* 17: 1925, pp. 145–64

Teufel, Richard. 1936. *Die Wallfahrtskirche Vierzehnheiligen*. Berlin: Deutscher Verein für Kunstwissenschaft.

Weingartner, Josef. [ca.1930]. *Römische Barockkirchen*. München: J. Kösel, F. Pustet.

Willich, Hans y Paul Zucker. 1914. *Die Baukunst der Renaissance in Italien. (Handbuch der Kunstwissenschaft 7)*. 2 vols. Wildpark-Potsdam: Athenaion.

Análisis estático de bóvedas

Astier, Maurice. 1903. Essai d'une théorie des voûtes d'égale résistance. *Nouvelles annales de la Construction 5éme série,* 10: 88–96, 110–112, 120–125.

Cosyn, Léon. 1901–1902. Étude théorique sur la résistance des voûtes. *Nouvelles annales de la Construction 5éme série*, 8–9. (8: 139–144, 153–160, 169–176, 188–192; 9: 9–16, 30–32, 41–46.)

Dunn, William. 1904. Notes on the stresses in framed spires and domes. *Journal of the Royal Institute of British Architects, Third series.* 11: 401B412.

Fairhurst, W. A. 1945. *Arch design simplified: A textbook on the rapid and economical design of arch bridges.* London: Concrete Publications.

Frick, Otto. 1927. *Handbuch der Steinkonstruktionen einschlienlich der Beton-und Grund baues*. Berlin: Geissler, 1927. (Trad. esp. *Construcción en piedra y ladrillo*. Madrid: Labor, 1947.)

Klopper, J. 1914. *Leerboek der toegepaste Mechanica*. Delft: Waltman.

Landsberg, Theodor. 1909. *Die Statik der Hochbaukonstruktionen. (Handbuch der Architektur, Teil I, Band I, Heft 2)*. Leipzig: Alfred Kröner Verlag.

Maurel, Ch. 1892. Notes sur la détermination de la courbe de pression unique correspondant a une hypothèse de charge déterminée dans les voûtes surbaissées. *Nouvelles annales de la Construction 4éme série,* 9: 166–168, 180–184, 197–200.

Meydenbauer, A. 1878. Die Einzeichnung der Stützlinie in Gewölbebau-Projecte. *Zeitschrift für Bauwesen*, 28: 393–412.

Planat, Pierre. 1891. *Encyclopédie de l'architecture et de la construction*. 6 vols. Paris: Dujardin.

Russo, Chr. 1932. *Schäden an Bauwerken*. München: 1932. (Trad. esp. *Lesiones de los edificios.* Barcelona: Salvat, 1934.)

Tourtay, C. 1902. Méthode de calcul rapide des voûtes et leurs culées. *Nouvelles annales de la Construction 5éme série,* 9: 135–144, 157–160, 169–176, Láms. 48–49.

Ungewitter, Georg-Gottlob y Karl Mohrmann. 1901–03. *Lehrbuch der Gotischen Konstruktionen*. 4ª ed. Leipzig: T. O. Weigel.

Wattjes, J. G. 1927. *Berekeningen van Bouwconstucties*. Amsterdam: Kosmos, 1927.

Wittmann, W. 1879. Zur Theorie der Gewölbe. *Zeitschrift für Bauwesen.* 29: 61B74.

Addenda.

[Obras citadas en el texto o en las láminas no incluidas en la bibliografía original]

Blondel, J.F. 1771–77. *Cours d'Architecture, ou Traité de la décoration, distribution et construction des bâtiments… continué par M. Patte.* Paris: Chez la Veuve Desaint.

Boito, Camillo. *Architettura del Medio Evo in Italia, con una introduzione sullo stile futuro dell'architettura italiana: ricerche*. Milano: U. Hoepli.

Deshoulières, François. 1929. *Au début de l'art roman. Les Églises de l'XI[e] siècle en France*. Paris: la Renaissance du Livre.

Durand-Claye, Alfred. 1879. *Étude sur la stabilité de la coupole projetée par Bramante pour la Basilique de Saint-Pierre de Rome*. Paris: Librairie Polytecnique de J. Baudry.

Egle, J. von y E. R. Fiechter. 1905. *Praktische Baustil- und Bauformenlehre auf geschichtlicher Grundlage. Bd. 2: Altchristliche und romanische Baukunst. Bd. 3: Gotische Baukunst.* Stuttgart: Wittwer. (Fácsimil, Hannover: Verlag Th. Schäfer. 1996).

Emy, Armand-Rose. 1837–1841. *Traité de l'art de la charpenterie*. 4 vols. Paris: Carilian-Goeury.

Fontana, Carlo. 1694. *Il Tempio Vaticano e sua origine*. Roma: Nella Stamparaia di Gio. Francesco Buagni.

Gay, C. 1924. *Ponts en maçonnerie.* (*Encyclopédie du Génie Civil et des Travaux Publics*). Paris: Librairie J. B. Baillière et Fils.

Gladbach, Ernst. 1868–71. *Vorlegeblätter zur Baukonstruktionslehre.* Zürich: Meyer u. Zeller.

Gnauth, Adolf. 1867. *Die Bauwerke der Renaissance in Toscana*. Wien: Foersters Allgemeine Bauzeitung.

Goodyear, W.H.. 1904. *Vertical Curves and Other Architectural Refinements in the Gothic Cathedrals and Churches of Northern France and in Early Byzantine Churches at Constantinople…* New York: Macmillan.

Guasti, Cesare. 1857. *La cupola di Santa Maria del Fiore illustrata con i documenti dell'archivio dell'opera secolare.* Firenze: Barbèra, bianchi e Comp.

Hoffstadt, Friedrich. 1840. *Gothisches ABC Buch, das ist: Grundregeln des gotischen Styls für Kunstler und Werkleute*. 2 vols. Frankfurt am Main: S. Schwerber.

Kohte, Julius. 1890. Die Kirche San Lorenzo in Mailand. *Zeitschrift für Bauwesen* 40: 195–220, 293–326, láms. 29–35.

Lethaby, W. R. y Harold Swainson. 1894. *The church of Sancta Sophia Constantinople. A study of Byzantine building*. New York. MacMillan:

L'Éveillé, Paul. 1856. *Note sur les voûtes biaises*. Le Mans: Monnoyer.

Milani, G.B. 1920. *L'ossature murale. Studio statico-costruttivo ed estetico-proporzio-nale degli organismi archittettonici…* Torino: C. Crudo.

Mosmans, Jan. 1931. *De St Janskerk te's Hertogenbosch*. Hertogenbosch: G.Mosmans Zoon.

Nardini, Aristide. 1885. *Filippo di ser Brunellesco e la cupola del Duomo di Firenze*. Livorno: Gius. Meucci.

O'Odonovan, Edmund. 1882–1883. *The Merv Oasis; travels and adventures east of the Caspian during the years 1879–80–81, including five months' residence among the Tekkés of Merv.* 2 Vols.New York: G. P. Putnam's sons.

Orth, A. 1873. Die Zionskirche in Berlin, *Zeitschrift für Bauwesen* 23: 7–8, 105–9, 423–438, láms. 5–12.

Place, Victor y Félix Thomas. 1867–1870. *Ninive et l'Assyrie*. 3 vols. Paris: Impr. impériale.

Poleni, Giovanni. 1748. *Memorie istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano*. Padova: Nella Stamperia del Seminario.

Ranisch, Bartel. 1695. *Beschreibung Aller Kirchengebäude Der Stadt Danzig. verfasset un gezeichnet durch Bartel Ranisch.* Danzig: J.-Z. Stollen.

Scheffler, Hermann. 1857. Theroie der Kuppelgewölbe. Die Kuppel der Peterskirche zu Rom. En: *Theorie der Gewölbe, Futtermauern und eisernen Brücken*. Braunschweig: Verlag der Schulbuchhandlung, 196–202, lám. 19.

Seidel, Georg Friedrich 1890. Baugeschichte des Domes und Klosters Ettal. *Zeitschrift für Bauwesen* 40: 177–194, láms. 26–28.

Thiersch, August. 1926. Proportionen in der Architektur. En: *Handbuch der Architektur, 4. Teil, 1. Halbband, Architektonische Komposition*. 4ª ed. Leipzig: Alfred Kröner.

Wijnperse, W. J. M. van de. 1918. Het Gewelf der Sassaniden. *Bouwkundig Weekblad* 39: 163–167.

Wright, H. y C. G. Sykes. 1923. The lantern of St. Paul's cathedral. *Architectural Review* 53: 98–101.

Índice de nombres y lugares

Las cifras en cursiva indican los números de las láminas

Índice de temas

Las cifras en cursiva indican los números de las láminas

ISBN: 978-84-9728-425-7
9 788497 284257